
Nancy-Université
Université
Henri Poincaré



École Doctorale EMMA

المدرسة الوطنية للمهندسين بتونس

École Nationale d'Ingénieurs de Tunis

Thèse en co-tutelle

Présentée pour l'obtention du Titre de

Docteur

de l'Université Henri Poincaré, Nancy Université

&

de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis

Spécialité : Génie Civil

par

Taoufik ACHOUR

Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques : cas des granulats calcaires tunisiens

Soutenue publiquement à Tunis le

15 Novembre 2007

« **Jury** »

Président	**M. Bouassida**	Professeur, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis
Rapporteurs	**G. Escadeillas**	Professeur des universités, INSA de Toulouse, Directeur du Laboratoire des Matériaux de Construction de Toulouse
	F. de Larrard	Professeur à l'ENPC, Directeur de recherche au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes
Examinateurs	**M. Ben Ouezdou**	Maître de conférences HDR, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis
	A. Lecomte	Professeur, Université Henri Poincaré, Nancy
	R. Mensi	Maître de conférences HDR, École Nationale d'Ingénieurs de Tunis
Invité	**A. Hamrouni**	Ingénieur général, Ex-Directeur du Laboratoire des Ponts et Chaussées de Tunis, Directeur général du laboratoire Géotechnique Routière et Matériaux de Construction, Tunis

Équipe Matériaux pour le Génie Civil
LCSM UMR 7555 - Université Henri Poincaré
IUT de Nancy-Brabois
F-54600 Villers-lès-Nancy, France

Laboratoire de Génie Civil
École Nationale d'Ingénieurs de Tunis
BP 37
1002, Tunis Belvédère, Tunisie

André Lecomte — Direction de thèse — Mongi Ben Ouezdou, Rachid Mensi

« Accomplir ses rêves n'est pas une chance,

mais le résultat d'un combat.

C'est les avoir à l'arrache, Quoi ! »

Nâdiya Zighem,

Championne de France d'athlétisme, 1989.
« Afrique magazine, N°247 – Avril 2006 ».

Avant propos

Initiée en 2001 par le Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire tunisien (MEHAT), cette recherche a été solidement soutenue par ce département car ses retombées doivent bénéficier au secteur du BTP du pays. Madame la Ministre ainsi que Monsieur Abdejelil HAMROUNI, alors Directeur du Laboratoire des Ponts et Chaussées de Tunis, aujourd'hui gérant du laboratoire de Géotechnique Routière et Matériaux de Construction (GRMC), ont appuyé favorablement l'objectif de ce travail.

Les travaux ont été réalisés parallèlement à mon activité professionnelle au sein du MEHAT où, en tant qu'Ingénieur en Chef, j'occupe le poste de Chef du Service des Travaux Neufs à la Direction Régionale de Tunis. Dans ce contexte, il m'a fallu trois années supplémentaires au délai normalement imparti pour finaliser la thèse.

Ces travaux n'ont pu aboutir qu'avec l'aide matérielle d'un grand nombre de partenaires industriels que je tiens à remercier ici. Il s'agit des directeurs des carrières de Aïn Tebournouk, de Nahli, de El Haoureb, de Jbel Ressas, de Jradou, de Tahent et de El Khlédia, qui se sont chargés notamment du transport des granulats. Des entreprises et des bureaux d'études ont également soutenu financièrement certains de mes déplacements en France. Enfin, le Ministère de l'Enseignement Supérieur Tunisien (MES) m'a octroyé une bourse d'alternance, à deux reprises.

Mes plus sincères remerciements vont également à Madame la Ministre et aux cadres et personnels du MEHAT. En particulier, Monsieur Lotfi BRAHAM, Directeur Régional de Tunis, m'a toujours encouragé par sa détermination et son amitié.

Cette thèse a été menée dans le cadre d'une cotutelle entre l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) et l'Université Henri Poincaré de Nancy (UHP). Je salue les efforts déployés par Messieurs Mongi BEN OUEZDOU et André LECOMTE pour concrétiser cette collaboration.

Les essais se sont déroulés au Laboratoire de Génie Civil de l'ENIT (LGC), au Centre d'Essais et des Techniques de la Construction (CETEC), au GRMC et à la société SIKA. J'adresse mes plus sincères remerciements aux personnels de ces organismes pour leur accueil toujours chaleureux. A ce titre, j'ai une pensée particulière pour Monsieur Khaled HOUAIDI, technicien à la Section Béton au CETEC, qui a testé la plupart des 720 éprouvettes réalisées

durant ce travail, et pour Madame Zeineb BEN AMOR, ingénieur au LGC, qui m'a permis d'utiliser le matériel de fabrication et de conservation des bétons.

L'encadrement scientifique de ce travail a été assuré par Messieurs Mongi BEN OUEZDOU, Rachid MENSI et André LECOMTE. Je les en remercie très sincèrement.

Monsieur Mongi BEN OUEZDOU, Maître de Conférences à l'ENIT, a toujours été disponible pour suivre mon travail. Il m'a apporté son soutien moral durant les moments les plus difficiles et il a su planifier le bon déroulement des différentes phases de cette étude.

Monsieur Rachid MENSI, Maître de Conférences à l'ENIT a orienté mes recherches dès leur début et il a défini les objectifs à atteindre. Il m'a appris à avoir un esprit de synthèse dans la rédaction. Ses conseils m'ont été très précieux.

Monsieur André LECOMTE, Professeur à l'UHP, m'a présenté les concepts scientifiques associés aux outils utilisés dans ce travail. A ses cotés, j'ai conforté un sens de la rigueur et de la précision que je n'avais pas auparavant. Je n'oublierai jamais sa réplique « c'est bien, mais..!».

Je voudrais aussi remercier les autres membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer ma recherche : Monsieur le Professeur Mounir BOUASSIDA, Monsieur le Professeur Gilles ESCADEILLAS et Monsieur François DE LARRARD. La réputation des travaux de Monsieur BOUASSIDA dans le domaine des mécaniques des sols est pour moi un gage de reconnaissance avéré. Messieurs ESCADEILLAS et DE LARRARD internationalement reconnus dans le domaine des bétons m'ont fait honneur d'accepter d'être rapporteurs de ma thèse. Je les remercie d'avoir répondu favorablement à cette demande malgré ses multiples occupations.

Je n'oublie pas Madame Cécile DILIBERTO ni Monsieur Jean-Michel MECHLING, Maîtres de Conférences à l'UHP, pour leur amitié. De même, je remercie Mesdemoiselles Imen JOUDI, Fatein RHIMI et Hela SARRAJ, jeunes doctorantes ou diplômées, qui ont contribué à certains essais. Enfin, que tous ceux dont je n'ai pas cité le nom veuillent bien me le pardonner!

J'ai une profonde reconnaissance envers mes parents et ma famille : mon père Mustapha, ma mère Mabrouka, mon frère Slim, ma sœur Rim, mon oncle Manoubi, mon cousin Mahmoud, mon beau père Abdelhamid, ma belle mère Fatma et mes deux beaux frères Bayrem et Heiykel.

Je dédie ce mémoire à ma femme Nesrine et mon fils Mustapha, que j'ai trop souvent « abandonnés » au cours de ces trois dernières années de travail… Enfin, je termine par une pensée pleine d'amour pour mon bébé **Mustapha**, le rayon de soleil de ma vie.

Taoufik ACHOUR, Juillet 2007.

Sommaire

Introduction

La Tunisie dispose sur son territoire d'une grande variété de gisements potentiellement aptes à donner des granulats à bétons. La connaissance et la gestion de ce patrimoine minéral sont des éléments déterminants pour le développement du pays. Elles incombent au Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire (MEHAT) qui à la charge de fixer les choix et les orientations stratégiques en matière de ressources granulaires en fonction des impératifs économiques et sociaux notamment. La valorisation de ces ressources dans les bétons hydrauliques est l'une de ses priorités, car ces matériaux consomment la majeure partie des granulats actuellement produits. En effet, près de 70 % de granulats concassés et près de 80 % de sables alluvionnaires roulés sont utilisés dans les bétons hydrauliques (habitations, ouvrages, etc.). Ces ratios différents de ceux d'autres pays, comme la France par exemple, où la majorité des granulats sont destinés à la chaussée. Les distances de transport sont aussi un critère à prendre en compte, compte tenu des impératifs liés au développement durable. Enfin, les sources d'approvisionnement en sables alluvionnaires sont en voie d'affaiblissement, en particulier dans les régions à fort développement, comme celle du district de Tunis.

Notre travail de recherche s'inscrit pleinement dans les objectifs cités. Il a pour but d'apporter une meilleure caractérisation des diverses ressources minérales du pays, plus particulièrement le Nord-Est et le Centre-Ouest, en vue d'envisager une utilisation potentielle dans les bétons hydrauliques. Sur le plan scientifique, il s'agit aussi de vérifier la faisabilité de béton de qualité courante en utilisant les sables de carrières jusqu'à présent écartés, en raison de leur teneur en fillers généralement élevée. Par conséquent, nos travaux se sont intéressés plus particulièrement à l'étude de l'influence des particules fines sur les propriétés mécaniques de bétons réalisés avec des sables et gravillons concassés essentiellement calcaires.

Le premier chapitre présente les potentialités du pays en matière de ressources minérales. L'accès à un inventaire à caractère confidentiel du MEHAT a permis de mieux connaître les ressources granulaires, en termes de production et d'évolution de la demande. Les données collectées sont issues de la préparation du VIIIème plan (1991-1996), actualisées pour certaines lors de la préparation du Xème plan (2001-2006). L'interprétation de ces données (calculs, graphiques) montre la stratégie adoptée par le MEHAT pour combler le

déficit de production dans certaines régions. Les mesures préconisées concernent principalement l'ouverture de nouvelles exploitations ou le renforcement de la production des carrières déjà existantes. Pour la première option et pour le district de Tunis, la formation de Jbel Lansarine est désignée comme source de remplacement des gisements en voie d'épuisement. Pour la seconde option, les gisements de Aïn Tebournouk, de Nahli, de El Haoureb, de Jbel Ressas, de Jradou et de El Khlédia sont retenus comme sources privilégiées d'approvisionnement pour le district de Tunis et la région du Centre-Est. Ces gisements ont donc été retenus pour notre étude. Ce chapitre montre aussi que les ressources granulaires concernées sont les plus souvent d'origines sédimentaires carbonatées (calcaires et dolomies). Une étude bibliographique montre que les caractéristiques mécaniques et chimiques des roches mères couvrent une large étendue de valeurs. Toutefois, la plupart des granulats issus de ces formations peuvent répondre à priori aux exigences des normes tunisiennes en vigueur pour un emploi dans les bétons hydrauliques.

Le second chapitre est consacré à l'identification détaillée des ressources granulaires retenues pour l'étude. Le site de Jbel Lansarine ne possédant pas d'exploitation, la carrière de Tahent, situé dans la continuité de la chaîne montagneuse de Jbel Lansarine, a été retenu pour représenter cette formation. Cette étude montre que les différentes roches sont de nature calcaire. Des essais de caractérisation usuels ont permis de mesurer les propriétés physico-mécaniques des granulats. Les granularités sont plutôt continues. Les masses volumiques réelles, les porosités et absorptions d'eau, les propretés et les résistances mécaniques varient sensiblement selon les provenances et la nature des roches mères. Un essai spécifique d'identification associé à l'utilisation du logiciel René-LCPC a consisté à mesurer la compacité de différentes fractions granulaires étudiées. Les valeurs obtenues sont nécessaires aux calculs des formules de bétons réalisées avec ces granulats. Ce chapitre présente aussi les caractéristiques du ciment utilisé. Il s'agit d'un ciment économique, de type Portland CEM II/A-L 32,5, couramment utilisé dans les centrales à bétons du district de Tunis. Il est fabriqué par la cimenterie Le Karrouba. Ses propriétés ont été fournies par le cimentier. Toutefois, sa résistance mécanique a été vérifiée aux échéances de 28 et 90 jours, et la composition du clinker a été déduite de l'analyse chimique, par application des formules de Bogue. La mesure de sa compacité a aussi été réalisée par un essai de pâte lisse.

Le troisième chapitre concerne l'étude de formulation de dix huit mélanges hydrauliques réalisés avec les six matériaux sélectionnés, avec lesquels ont été fabriqués des

mortiers, des micro-bétons et des bétons. Trois fractions granulaires ont été fournies par chaque carrière - hormis celles de Tahent et de de El Khlédia ou une seule fraction, par carrière, est donnée - ; un sable, un gravillon intermédiaire et un gravillon plus grossier. Les formules retenues ont été celles habituellement réalisées pour les bétons destinés à la construction d'habitations. Elles ont été proposées par le CETEC. Seul le dosage en eau a été ajusté, si nécessaire, pour atteindre une maniabilité satisfaisante (mélange plastique). Par suite, les granularités des mélanges ont été comparées à celles données par la méthode de Dreux-Gorisse appliqué aux matériaux fournis, puis à celles données par le logiciel BétonlabPro2 du LCPC. Les résultats obtenus montrent que les squelettes granulaires de la plupart de ces mélanges ne sont pas optimisés. Seuls les *bétons* réalisés avec les granulats de Aïn Tebournouk, de El Haoureb, de Jbel Ressas et de Jradou présentent des compacités à sec assez voisines de celles des mélanges optimisés. Ce chapitre est complété par le calcul de certains paramètres caractéristiques des mélanges réalisés (indices de serrage et potentiel de ségrégation).

Le chapitre IV introduit le formalisme des modèles du LCPC de prédiction de la résistance à la compression, de la résistance à la traction et du module d'élasticité utilisés par la suite. Les mesures expérimentales des propriétés des mélanges, réalisées aux échéances de 1, 3, 7, 14, 28, 90, 180 et 365 jours, sont données à ce stade. L'évolution de ces propriétés dans le temps confirme le bien fondé du concept de ces modèles. En particulier, le rôle joué par le granulat et la surface de contact pâte-granulat est mis en évidence pour chacune des propriétés. Ce chapitre constitue une introduction aux chapitres V et VI, cœur de ce mémoire.

Le chapitre V compare les mesures de résistance à la compression réalisées sur les différents mélanges hydrauliques calcaires (éprouvettes cylindriques 16x32 conservées dans l'eau à 20 °C) aux prévisions du modèle du LCPC. Les résistances expérimentales sont souvent sous-estimées par ce modèle. Une extension est alors proposée en reliant le coefficient d'adhérence pâte-granulat à la teneur relative en fillers calcaire des mélanges. L'hypothèse est que ces fillers associés à la pâte de ciment modifient les propriétés de rigidité de la matrice, de sorte qu'elles se rapprochent de celle du granulat, améliorant ainsi le comportement et l'ancrage mécanique de la liaison (meilleure homogénéité du système) et, finalement, la résistance du composite. Cette approche permet de retrouver les caractéristiques moyennes de la roche mère, même si les proportions granulaires des mélanges ne sont pas

optimisées. La validation de cette approche est effectuée sur des mélanges mixtes, riches en fillers, à base de différents granulats.

Le chapitre VI traite de la résistance à la traction et du module d'élasticité des bétons réalisés. Pour le premier volet, l'écart moyen entre les prévisions du modèle du LCPC et données expérimentales est assez important. Le recours à un modèle de type loi de puissance ou loi hyperbolique, dont les paramètres de chacun de ces lois sont bien ajustés, permet de mieux rapprocher prévisions et résultats expérimentaux. L'intérêt du modèle hyperbolique est qu'il apporte une interprétation physico-mécanique au comportement à la traction des mélanges. Ses paramètres sont reliés à la résistance du granulat et à la cohésion dans la zone de transition pâte-granulat. Ils sont aussi reliés aux propriétés intrinsèques du granulat (coefficient Los Angeles), ce qui permet de mieux interpréter le développement de la traction en fonction de la nature du granulat. Comme précédemment, la validité de ce modèle est vérifiée sur des mélanges mixtes réalisés avec différents granulats. Pour le second volet (module d'élasticité), le modèle de LCPC permet d'estimer le module du granulat à partir du module du béton et du module de la phase liante. Les résultats trouvés pour les différents granulats sont cohérents avec les propriétés mécaniques mesurées sur les matériaux, ce qui confirme la pertinence de ce modèle pour les bétons calcaires.

Finalement, les travaux réalisés durant cette recherche apportent une meilleure connaissance du comportement mécanique des bétons calcaires. Ils forment aussi un ensemble assez complet de résultats originaux devant permettre aux services de l'administration, aux exploitants, et aux chercheurs de mieux caractériser les ressources granulaires tunisiennes en vue de leur valorisation dans les bétons hydrauliques de demain. Elles constituent également un support théorique et pratique pour adapter les exigences des cahiers de charges à ces matériaux. Enfin, elles peuvent initier d'autres recherches sur l'utilisation des ressources granulaires dans les techniques routières, à base de liants hydrauliques ou de liants hydrocarbonés par exemple.

Notons enfin que la bibliographie relative à ce mémoire de thèse est présentée par chapitre. Il en résulte qu'une même référence peut être appelée à plusieurs reprises, sous différents numéros.

Chapitre I

Potentialité et qualité des ressources granulaires en Tunisie

I.1. Introduction

Depuis le début de son histoire, l’homme a toujours eu recours à des matériaux naturels pour édifier ses constructions. Par exemple, en Tunisie, les Romains [1] construisaient des bâtiments et des ouvrages en utilisant les pierres qu’ils extrayaient du sol, auxquelles ils donnaient des formes particulières grâce à une élaboration poussée. C'est bien plus tard, avec l’apparition du ciment, que l’art de construire a connu une véritable révolution. Au XXème siècle, l’invention du béton a permis de remplacer la pierre de taille par un composé à base de granulats (sables, gravillons) liés entre eux par un liant hydraulique. Les exigences modernes obligent aujourd’hui les producteurs de granulats à proposer des produits répondant à des critères bien précis pour élaborer ce matériau composite indispensable à nos civilisations. L'exploitation des gisements est ainsi devenue une activité importante du développement industriel d’un pays.

En Tunisie, au cours du VIIIème plan (1991-1996), la consommation annuelle de granulats a été de 40 millions de tonnes environ pour l’ensemble des travaux de construction [2]. Ramenée au nombre d’habitants, cette consommation correspond à un ratio de 5 tonnes par an et par habitant. A titre de comparaison, la France avait, durant la même période, un ratio de 7,1 tonnes par an et par habitant [3]. Cette consommation, plutôt importante pour un pays émergeant, entraîne l’épuisement de certaines ressources naturelles et une surexploitation des réserves, en créant un impact souvent négatif sur l’environnement. Ce secteur a absorbé plus de 30 % des investissements prévus au VIIIème plan. Depuis, ce chiffre est en progression constante, compte tenu de l’évolution croissante des besoins et de l’augmentation des coûts de transport.

Mais les ressources minérales ne sont pas inépuisables. Il importe, donc, pour l’intérêt général, de les utiliser le plus rationnellement possible afin d’assurer au mieux leur pérennité, dans le cadre des dispositions liées au développement durable, notamment. La gestion du patrimoine minéral est confiée à la Direction des Carrières et des Explosifs du Ministère de l’Équipement, de l’Habitat et de l’Aménagement du Territoire (MEHAT). Ce service tient compte d’études économiques pour fixer les orientations stratégiques du pays en matière de ressources granulaires.

Le premier objectif de ce chapitre est de donner un inventaire des ressources granulaires de la Tunisie, en termes de production et d'évolution de la demande. Il est basé sur les données bibliographiques disponibles. Les chiffres datent de 1991 [4]. Ils ont été définis lors de la préparation du VIIIème plan (1991-1996). De nouvelles données, issues du Xème plan (2001-2006), viennent compléter cet inventaire [5]. Elles permettent tout d'abord de comparer les prévisions des deux plans à l'échéance de 2006, pour les besoins en granulats concassés et, ensuite, d'actualiser les capacités installées de production à la même échéance. Il convient de noter que la publication de ces données confidentielles, dans le présent travail, a nécessité l'autorisation préalable de Madame le Ministre de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire. Cependant, et selon ses consignes, leur exploitation à d'autres fins, notamment industrielles, est strictement prohibée.

L'autre objectif de ce chapitre est de rappeler les orientations stratégiques du pays en matière de ressources granulaires. Elles montrent que ce secteur de la construction a besoin, en outre que le renforcement de la production actuelle, de nouvelles exploitations pour combler le déficit de production de certaines régions. Les prospectives analysées concernent les granulats concassés et les sables roulés.

L'étude de l'impact du coût de transport sur l'économie de la construction est aussi examinée. L'exemple d'un « tout venant 0/20 » issu de plusieurs carrières, vendus dans la région de Tunis, montre que le prix de départ peut être même triplé lorsque les granulats sont transportés par camion sur une distance de 35 km environ.

La dernière partie de ce chapitre, essentiellement bibliographique, concerne l'origine géologique, la nature et la qualité des roches exploitées en Tunisie. Elles sont pour l'essentiel d'origines sédimentaires carbonatées (calcaires et dolomies). Une interprétation des données complète cette analyse. Elle montre que certains gisements ne sont pas aptes à former des granulats à béton, alors que de nombreux autres ont les qualités suffisantes, voire supérieure. Toutefois, l'exploitation intensive et, parfois, désordonnée de ces produits « nobles » entraîne le risque d'un épuisement prématuré des ressources de certaines régions. L'inventaire a été établi sur la base d'un rapport de la Direction des Carrières et des Explosifs [4], complété par un rapport du CETEC [6] et par certaines données issues de la thèse de M. Added [7].

I.2. La demande et son évolution

Lors de la préparation du VIIIème plan quinquennal (1991-1996), les besoins en ressources granulaires naturelles à l'horizon 2011 ont été évalués. Pour cette estimation, la Direction des Carrières et des Explosifs a adoptée la démarche qui consiste à comptabiliser les besoins de 1991 en granulats, sur la base d'estimations prenant en compte la quantité de produit de carrières consommée par type d'activité (Tab. I), et, par projection statistique, à prévoir l'augmentation dans le temps à partir de taux probables d'accroissement. Pour les travaux routiers, le taux retenu était de 5 % par an. Pour la construction d'habitations et l'aménagement des zones urbaines, le taux considéré a été pris égal à celui enregistré entre 1984 et 1989, soit 3 % par an [8]. Le Tab. I-I reprend les chiffres qui ont servi à établir les estimations du XIIIème plan. Il est complété par ceux du Xème plan (qui seront utilisés par la suite).

Les produits de carrières (granulats et autres substances utiles) auxquels la Direction des Carrières et des Explosifs s'est intéressée sont les suivants :

- granulats concassés et pierres de construction produits à partir des roches sédimentaires carbonatées. L'extraction de ces produits se fait généralement par abattage à l'explosif, après élimination de la découverte (terre végétale et roche altérée surplombant le front de taille). Cette étape est suivie du concassage du matériau pour l'amener aux dimensions d'utilisation. Ces granulats ne sont très généralement pas lavés. L'argile éventuellement présente peut être réduite par scalpage ;
- granulats non concassés (sables roulés) produits généralement à partir d'alluvions siliceuses. L'extraction de ces produits se fait à la pelle mécanique en site terrestre ou par dragage en site aquatique. Ce sont les conditions économiques de l'installation et du marché qui dictent le choix du matériel à utiliser. Contrairement au produit précédent, le concassage est ici une opération auxiliaire. Le criblage est très généralement pratiqué en présence d'eau (lavage), car les gisements se situent souvent sous la nappe phréatique. Ainsi, les sables roulés ne contiennent que très peu, voire pas d'éléments fins [9], à l'opposé des sables de concassage qui en contiennent souvent beaucoup (de 5 à 25 %) ;
- argiles qui, par transformation en pâte, façonnage, séchage et cuisson servent à la fabrication des briques, hourdis et autres produits rouges [10], très prisées en Tunisie ;
- le gypse dont la principale utilisation est le plâtre et les ciments [10].

Les principaux secteurs de consommation de ces produits de carrière, présentés dans [4], sont :

- le secteur routier ;
- la construction des habitations ;
- le secteur d'aménagement des zones d'habitations ;
- le secteur touristique ;
- la construction de barrages.

Le secteur lié à la fabrication des ciments n'est pas considéré dans cet inventaire. L'hypothèse est que les carrières cimentières sont généralement implantées à proximité des usines. Le flux de matériau est alors considéré comme un flux interne à cette industrie.

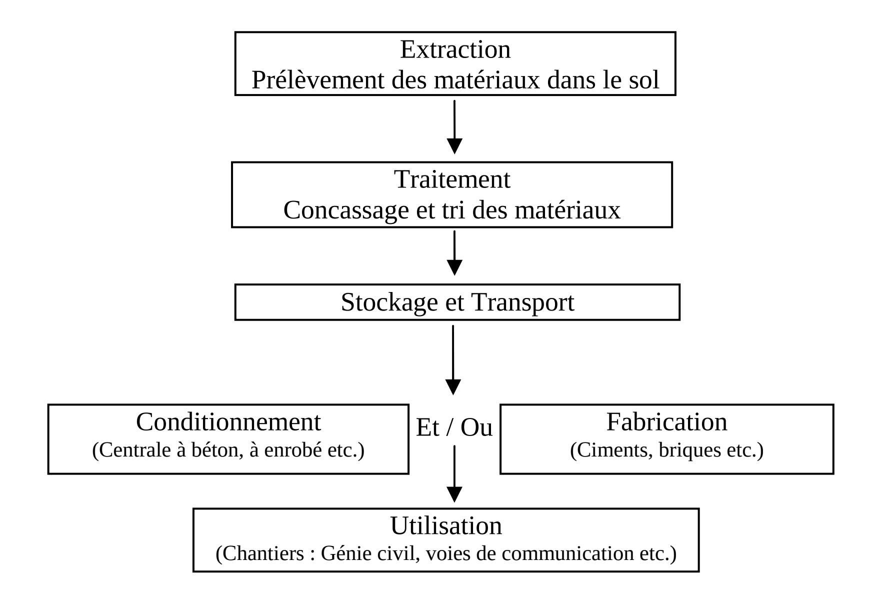
Tab. I-I : Valeurs ayant servi de base pour les estimations quantitatives des consommations de produits de carrières (VIIIème et Xème plan). [4, 5]

Spécifications		Unité	Quantité unitaire (m^3)	
			VIIIème plan	Xème plan
Construction et préparation des routes	Aménagement du réseau classé	1 km	3354	3350
	Renforcement du réseau classé	1 km	744	1740
	Comblement des lacunes du réseau classé (développement régional)	1 km	1677	5300
	Aménagement des pistes agricoles	1 km	2210	2736
	Revêtement des pistes agricoles	1 km	110	150
	Construction du réseau autoroutier	1 km	6708	17006
	Construction des Ouvrages d'Art	1 km		16800
	Construction des Voiries des villes et de leurs voiries structurantes	1 km		4145
Construction d'habitations		1 m^2/couvert	0,6	0,7
Aménagement des zones d'habitations		logement	40	40
Programme touristique		1 lit (30m^2)	12	18
Construction de barrages		1 barrage	600x10^3	500x10^3

Selon [8], le secteur de l'habitation a consommé, durant l'année 1989, plus de 70 % de la production totale des granulats (concassés et roulés). Le principal consommateur dans ce secteur est le béton hydraulique.

Dans le cas général, les étapes de production et de transformation de ces produits sont schématisées selon le diagramme ci-dessous (Fig. I-1). Les phases de conditionnement et de fabrication se situent généralement sur le site d'extraction, par nécessité économique.

Fig. I-1 : Diagramme de production et de transformation des produits de carrières.



I.2.1. Carrières (implantation, production et réserve) – Situation en 1991

La Tunisie ne dispose que d'un inventaire assez ancien de ses carrières (1991). Il ne tient donc pas compte de la fermeture ou de l'ouverture des exploitations depuis cette date. A notre connaissance, aucune tentative d'actualisation de cet inventaire n'a été faite à ce jour.

Les éléments de cet inventaire sont les cartes de localisation des carrières [11], disponibles uniquement à la Direction des Carrières et des Explosifs. Elles constituent une banque de données pour l'identification des carrières en Tunisie. Elles sont accompagnées de fiches contenant des données relatives à l'identité de l'exploitant, à la situation foncière de la carrière, à la nature et à la quantité des matériaux extraits, et enfin à la situation de l'exploitation (active ou inactive). Leur implantation est portée sur les figures I-2 et I-3.

Ces cartes mentionnent environ 3300 points d'extraction, mais le fichier ne concerne que 921 carrières exploitées, réparties par classe (artisanale ou industrielle), par produit et par région.

Fig. I-2 : Les gîtes de sables, d’argiles, de gypses et de pierres marbrières en Tunisie.

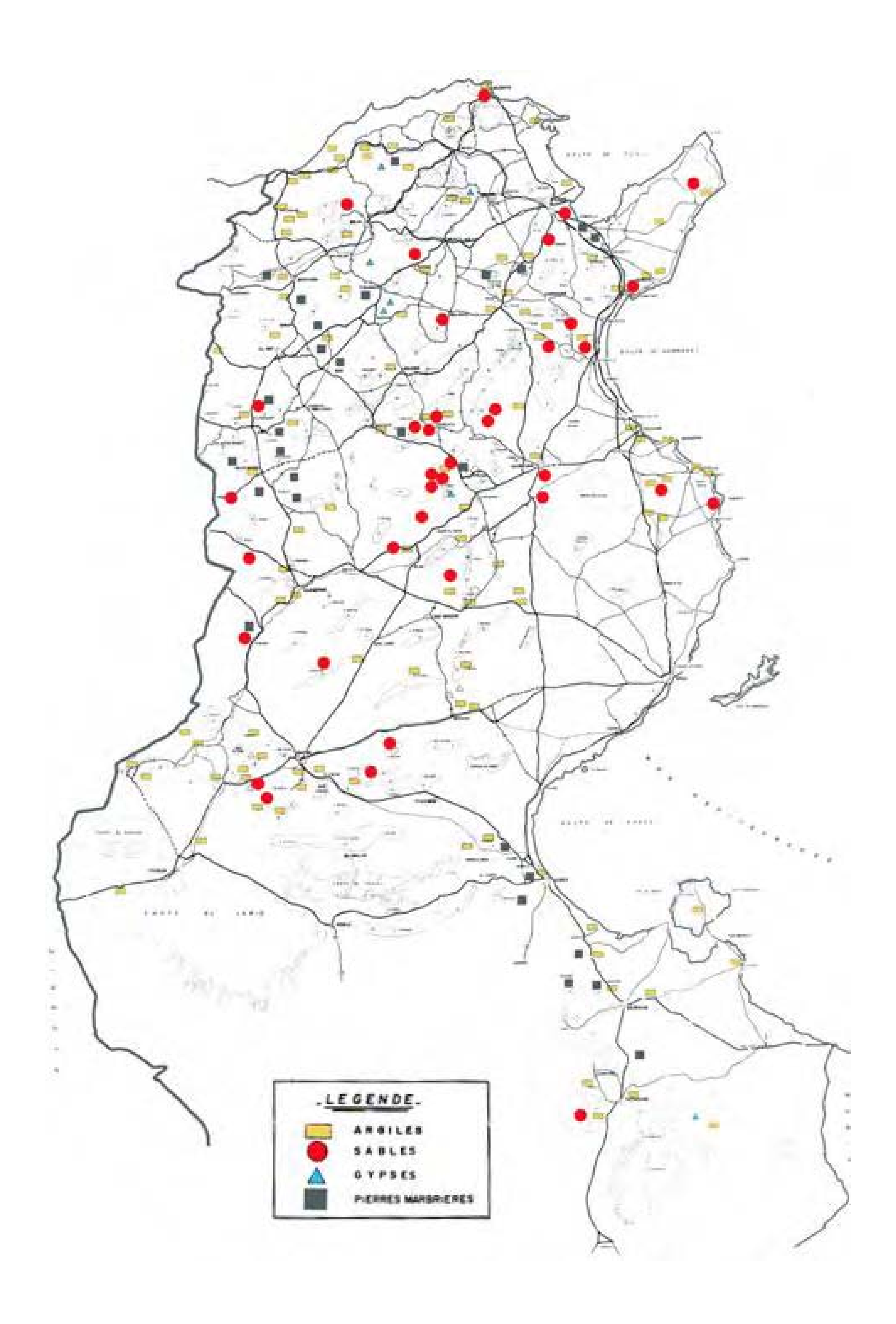
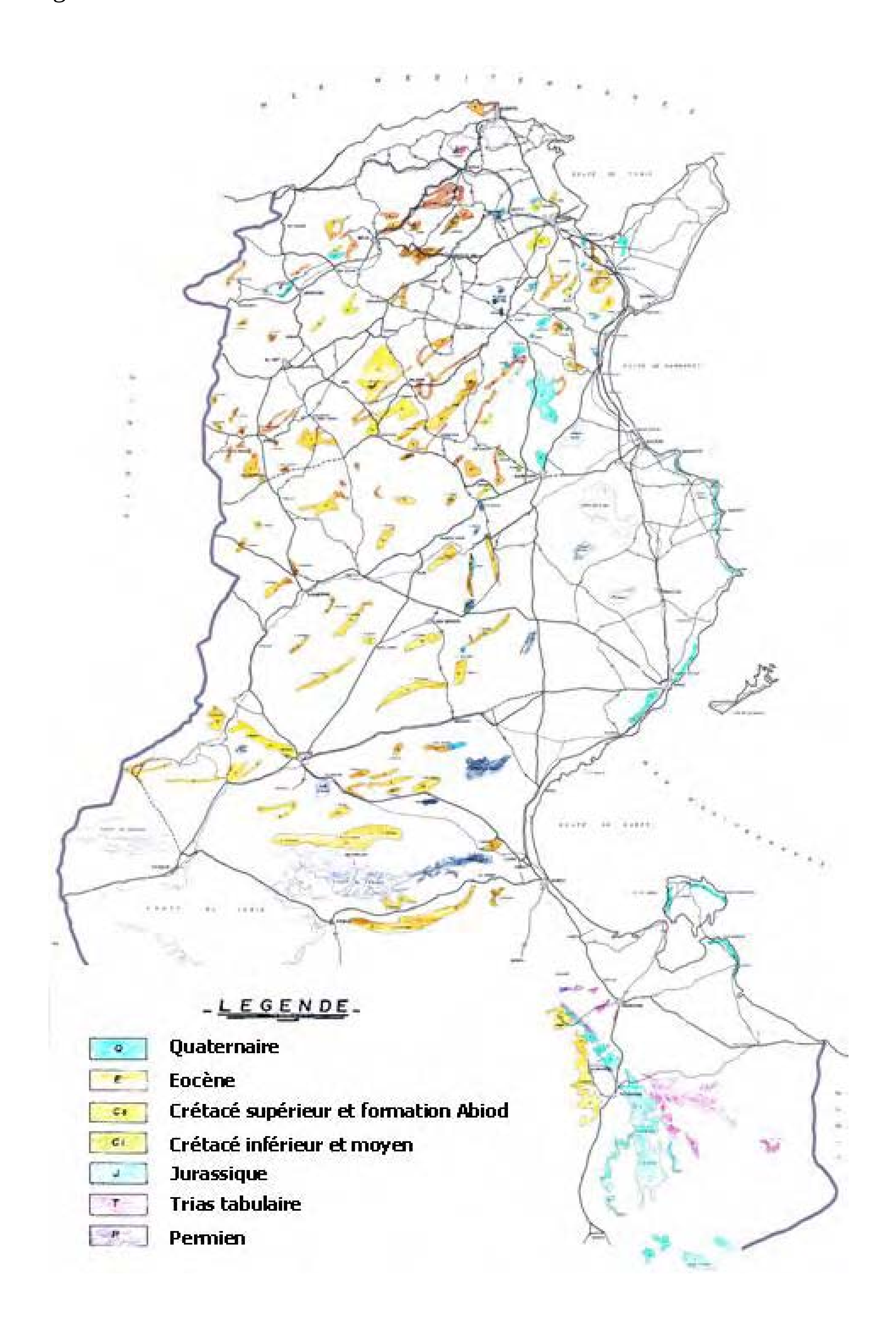


Fig. I-3 : Les gîtes des roches carbonatées en Tunisie.



Par commodité de présentation, la Direction des Carrières et des Explosifs a subdivisé le pays en six régions regroupant chacune plusieurs gouvernorats [4]. Cette répartition est donnée dans le Tab. I-II et sur la carte reproduite Fig. I-4. Le district de Tunis, dans la région du Nord-Est, regroupe les gouvernorats de Tunis, de Ariana, de Ben Arous et, récemment, de Manouba. Le Tab. I-III donne le nombre de carrière par région et par substance. On notera l'importance du nombre de carrières artisanales, de petite taille. Elles sont tenues par de petites entreprises familiales qui ont un rôle important dans le tissu socio-économique de chaque région. Leur production déclarée est donnée dans le Tab. I-IV. Les chiffres ne concernent que 419 des 921 déclarations. Plusieurs fiches portent la valeur zéro. Il est à noter que certains carriers ne fournissent pas leur vraie production. Enfin, le Tab. I-V donne les réserves annoncées par les carriers. Ces estimations concernent uniquement 506 fiches.

Fig. I-4 : Répartition géographique des régions.



Tab. I-II : Subdivision du pays en régions. [4]

Nord-Est	Nord-Ouest	Centre-Est	Centre-Ouest	Sud-Est	Sud-Ouest
District de Tunis	Béja	Sousse	Kairouan	Gabès	Gafsa
Nabeul	Jendouba	Monastir	Kasserine	Medenine	Tozeur
Zaghouan	Kef	Mahdia	Sidi Bou Zid	Tataouine	Kébili
Bizerte	Siliana	Sfax			

Tab. I-III : Nombre des carrières par région et par matière. [4]

Nombre de Carrières	Matière	Argile			Gypse			Pierre			Pierre de taille			Pierre Marbrière		Sable roulé			Total	Dont
	Classe	Art.	Ind.	S/T	Art.	Ind.	S/T	Art.	Ind.	S/T	Art.	Ind.	S/T	Ind.	S/T	Art.	Ind.	S/T		Ind.
Région	Nord-Est	4	5	9	1	7	8	116	75	191		2	2	6	6	105	10	115	331	105
	Nord-Ouest	10	1	11		1	1	44	22	66	1		1	8	8	26		26	113	32
	Centre-Est		1	1				227	9	236	1	2	3			16		16	256	12
	Centre-Ouest		1	1	2		2	41	33	74				5	5	14		14	96	39
	Sud-Est	1	1	2				73	9	82		3	3			8		8	95	13
	Sud-Ouest							26	2	28						2		2	30	2
	Total	15	9	24	3	8	11	527	150	677	2	7	9	19	19	171	10	181	921	203

Art. : Artisanale, Ind. : Industrielle

Tab. I-IV : Production déclarée des carrières par région et par matière. [4]

Production (par millier de tonnes)	Matière	Argile			Gypse		Pierre			Pierre de taille			Pierre Marbrière		Sable roulé			Total
	Classe	Art.	Ind.	S/T	Ind.	S/T	Art.	Ind.	S/T	Art.	Ind.	S/T	Ind.	S/T	Art.	Ind.	S/T	
Région	Nord-Est	8	399	407	370	370	693	11057	11750		27	27	46	46	837	945	1782	28764
	Nord-Ouest	16	6	22			684	2270	2954	1		1	13	13	168		168	6316
	Centre-Est		50	50			904	213	1117						70		70	2474
	Centre-Ouest						237	3777	4014				61	61	210		210	8570
	Sud-Est	7		7			490	1450	1940		305	305			3		3	4510
	Sud-Ouest						204	220	424						49		49	946
	Total	31	455	486	370	370	3212	18987	22199	1	332	333	120	120	1337	945	2282	51580

Art. : Artisanale, Ind. : Industrielle

Tab. I-V : Réserves annoncées des carrières par région et par matière. [4]

Somme des réserves (par millier de m^3)	Matière	Argile	Gypse	Pierre	Pierre de taille	Pierre Marbrière	Sable roulé	Total
Région	Nord-Est	4262	4300	230274	170	1400	26138	266544
	Nord-Ouest	209	0	54070	10	800	4960	60049
	Centre-Est	480	0	14937	0	0	1385	16802
	Centre-Ouest	0	0	78484	0	3984	5730	88198
	Sud-Est	375	0	38750	6700	0	110	45935
	Sud-Ouest	0	0	4502	0	0	250	4752
	Total	5326	4300	421017	6880	6184	38573	482280

Ces données montrent que les plus fortes productions se situent dans la région du Nord-Est. L'activité économique de cette région, qui comprend le district de Tunis, a

évidemment favorisé l'implantation des carrières. On constate en effet que plus de la moitié des carrières industrielles du pays sont en exploitation dans la région du Nord-Est (105/203), soit environ 51 % de la capacité de production du pays. Une lecture plus détaillée des données issues de [4], par type de production et en termes de nombre de carrières (valeurs non communiquées ici) montre que le district de Tunis possède 37 carrières industrielles de pierre et 6 de sable roulé. Ramené à la région du Nord-Est, le nombre de ces carrières représente respectivement la moitié environ (37/75) et les deux tiers (6/10) des carrières de cette région. Le district de Tunis était donc (et reste encore) le pôle principal du développement économique de la région du Nord-Est et du pays. D'ailleurs, à cette époque, plus du cinquième de la population du pays, plus de la moitié de l'activité industrielle et près des deux tiers des activités de services, tourisme excepté, étaient concentrées dans ce district [8]. De plus, le décryptage des données montre que la région du Nord-Est exportait aussi des produits de carrières (principalement des granulats pour la construction) vers la région du Centre-Est, qui est dépourvue de ressources aptes à donner des granulats.

Dans la zone centrale de la Tunisie (Centre-Est et Centre-Ouest) est implantée 25 % environ des carrières industrielles du pays, avec une production de 19 %. Les réserves annoncées pour la région du Centre-Ouest représentent 18 % de la totalité des réserves du territoire. Cette région est également une zone d'approvisionnement privilégiée pour le Centre-Est.

Enfin pour le sud, le nombre de carrières industrielles est très limité (7 %) et la production correspondante est faible (9 %). Les réserves annoncées dans les carrières exploitées sont assez faibles et elles ne permettraient pas, en l'état actuel, un développement soutenu de cette région.

I.2.2. Besoins en granulats pour la période du VIIIème plan (1991-1996)

La production et la consommation des granulats, en 1991, ont été estimées lors de la préparation du VIIIème plan à environ 7 millions de m^3 (hors cimenteries) [4]. Nous reprenons ci-après le détail des prévisions des besoins en granulats (concassés et roulés) pour chaque type de consommations. La part attribuée aux « autres consommateurs », telles que l'aménagement des zones industrielles et touristiques, la construction et l'extension

d'infrastructures portuaires, etc., a été estimée à 20 % de la totalité des produits des principales consommations. Il est à signaler, d'après l'avis verbal des responsables de la Direction des Carrières et des Explosifs, que ces prévisions ont été respectées, ce qui suppose donc que les travaux afférents à chaque type de consommation, durant cette période, ont été réalisés.

I.2.2.1. Programme routier

Le VIIIème plan prévoyait le renforcement de 2620 km de routes et la construction de 60 km d'autoroute [4], selon la répartition donnée ci-après (Tab. I-VI). Les besoins en produits de carrières correspondant étaient estimés à environ 5,3 millions de m^3 de granulats concassés, soit 1,3 millions par an. Les renforcements routiers concernaient essentiellement l'aménagement du réseau classé et, dans une moindre mesure, des pistes agricoles. On constate que pour l'exécution de ces travaux, le VIIIème plan ne prévoyait pas de besoins en sables roulés.

Tab. I-VI : Quantités de granulats concassés prévues par le programme routier (VIIIème plan). [4]

	Linéaire (km)	Quantités (1000 m^3)
Réhabilitation, modernisation et aménagement du réseau classé	825	2767
Renforcement du réseau classé en enrobé	285	212
Comblement des lacunes du réseau classé	210	352
Aménagement de pistes agricoles	700	1547
Revêtement des pistes	600	66
Total (Travaux de routes)	2620	4945
Construction d'autoroute	60	402
Total général	2680	5347

I.2.2.2. Construction d'habitations

Le VIIIème plan prévoyait la construction de 220000 logements pour le secteur contrôlé et environ 110000 logements pour le secteur non contrôlé. Des superficies moyennes par catégorie d'habitation [4] ont été considérées pour les calculs. Les valeurs sont portées dans le Tab. I-VII, avec les consommations correspondantes en granulats. Selon ces considérations, les besoins s'élevaient à 18 millions de m^3 de granulats concassés et de 18 millions de m^3 de sables roulés, soit en consommation annuelle un volume de 4 millions de m^3 pour chacun. Le principal consommateur était le secteur privé. A cette époque, l'administration avait prévu des

mesures d'encouragement pour ce secteur, afin de tenter de réduire le taux de chômage élevé chez les jeunes (40 % des moins de 35 ans étaient sans emploi [8]).

Tab. I-VII : Quantités de granulats pour la construction d'habitations prévues par le VIIIème plan. [4]

Promoteurs		Nombre d'habitations	Superficie (m^2)		Quantités totales (1000 m^3)	
			Moyenne	Totale	Granulat concassé	Sable roulé
SNIT*	Populaire	17360	50	868000	521	521
	Amélioré	2847	75	213525	128	128
	Économique	7741	100	774100	464	464
	Standing	271	120	32520	20	20
SPROLS**		5431	120	651720	391	391
Autres promoteurs		1928	120	231360	139	139
Remplace. d'habit. primaires		17723	50	886150	532	532
Secteur privé		166960	120	20035200	12021	12021
Habitations non contrôlées		110131	60	6607830	3965	3965
Total		330392	92	30300405	18180	18180

* Société Nationale Immobilière de Tunisie
** Société de PROmotions des Logements Sociaux

I.2.2.3. Aménagement des zones d'habitations

En considérant 330000 habitations à aménager, une densité de 25 logements par hectare et un linéaire de rue de 200 ml par hectare [4], l'apport en produits de carrières pour l'aménagement des zones d'habitations (rues, trottoirs etc.) a été évalué à près de 7,5 millions de m^3; soit 1,5 millions de m^3 par an. Le Tab. I-VIII donne, pour chaque classe granulaire, le détail de ces prévisions. Comme pour les travaux routiers, les sables roulés n'ont pas été considérés pour la réalisation de ces travaux.

Tab. I-VIII : Quantités de granulats prévues pour l'aménagement des zones d'habitations (VIIIème plan). [4]

Granulats	Largeur (m)	Épaisseur (m)	Quantités totales (1000 m^3)
Grave concassée 0/31,5	9	0,2	4758
Grave concassée 0/20	6	0,15	2379
Gravillon 12/20	6	0,012	190
Gravillon 8/12	6	0,01	159
Total			7485

I.2.2.4. Programme touristique

Le Programme touristique avait prévu, durant la période du VIIIème plan, la construction de 35000 lits [4]. Il a été considéré, pour les calculs, une superficie moyenne de 30 m^2 par lit, y compris les locaux communs, et les mêmes ratios de consommation de granulats que pour la construction d'habitations. Par conséquent, la consommation totale était de 0,63 million de m^3 de granulat concassé et de 0,63 million de m^3 de sable roulé, soit 0,13 million de m^3/an pour chacun.

I.2.2.5. Construction de barrages

Les actions d'intervention du VIIIème plan relatives à la construction de barrages ne concernaient que les deux barrages de Sidi Aïch et Rmel, situés dans le Nord-Ouest du pays [4]. Les quantités estimées de granulat et d'enrochement ont été évaluées à 1 million de m^3, et celles de sable roulé à 0,22 million de m^3, ce qui correspond à une consommation moyenne annuelle de 0,2 million de m^3 de granulat et d'enrochement et une quantité de 0,05 million de m^3 de sable roulé.

I.2.2.6. Bilan des consommations. Commentaires

L'ensemble des besoins estimés pour les différentes consommations est repris dans le Tab. I-IX. Les besoins annuels moyens prévus durant la période du VIIIème plan étaient alors d'environ 8 millions de m^3 de granulat concassé et 4,5 millions de m^3 de sable roulé.

En résumé, les figures I-5 et I-6 illustrent les besoins en granulats par nature et par type de consommation, pour la période du VIIIème plan.

Tab. I-IX : Consommation totale de granulats (VIIIème plan).

Désignation		VIIIème plan		Annuelle	
		Granulat concassé	Sable roulé	Granulat concassé	Sable roulé
		Quantités (1000 m^3)			
Routes		5347		1069	
Habitations	Construction	18180	18180	3636	3636
	Aménagement des zones	7485		1497	
Tourisme		630	630	126	126
Barrages		1003	229	201	46
Divers		6529	3808	1306	762
Total		**39175**	**22847**	**7835**	**4569**

Fig. I-5 : Répartition des besoins en granulats concassés par consommateurs (VIIIème plan).

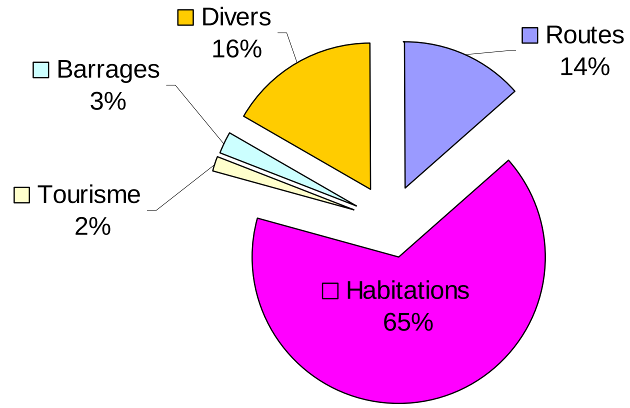
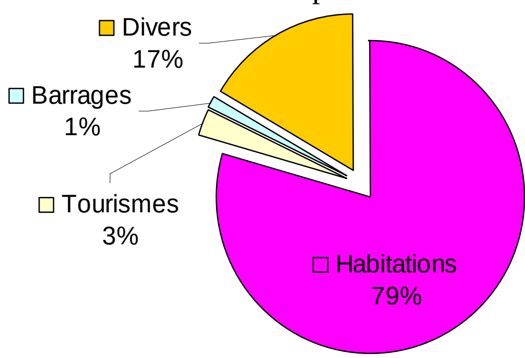


Fig. I-6 : Répartition des besoins en sables roulés par consommateurs (VIIIème plan).



Ces prévisions, bien qu'elles ne soient plus d'actualité, permettent cependant de tirer les constats suivants :

- le VIIIème plan prévoyait que la plus grande part des besoins en granulats serait pour la construction d'habitations et, donc, indirectement, pour la fabrication des mélanges hydrauliques. Cet état de fait traduit, durant cette période, les orientations stratégiques du pays en matière de développement social ;
- le faible taux qui apparaît pour les travaux routiers est dû au fait qu'il ne tient pas compte des besoins annexes des autres centres de consommations ;
- le secteur touristique (construction d'hôtels, etc.) et le secteur lié à la construction des barrages (protection des villes contre les inondations par exemple) n'ont pas été privilégiés lors de la préparation de ce plan. On pourra noter cependant que la Tunisie dispose d'un littoral côtier d'une longueur avoisinant 1200 km pouvant ainsi encourager des investisseurs à exploiter ce patrimoine.

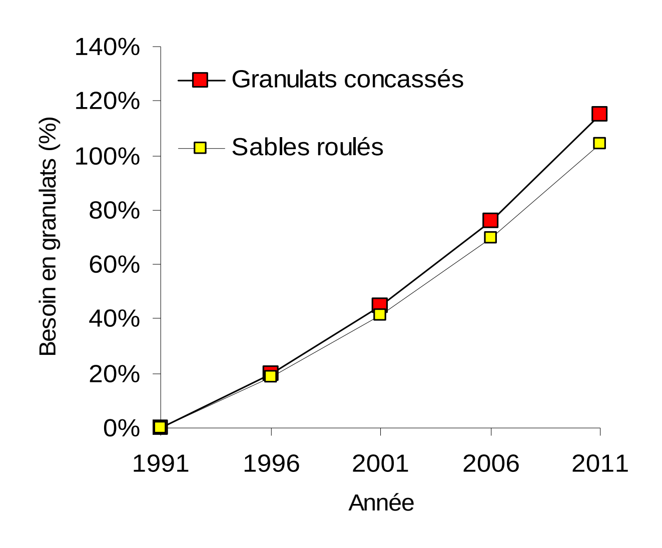
I.2.3. Besoins en granulats à l'horizon 2011 (prévisions du VIIIème plan)

Outre une évaluation des besoins entre 1991 et 1996, le VIIIème plan donnait aussi une prospective, par région, des besoins en granulats à l'horizon de 2001, 2006 et 2011. Les chiffres sont résumés dans le Tab. I-X [4]. L'évolution de ces besoins par rapport à 1991 est reportée sur la Fig. I-7.

Tab. I-X : Prospective des besoins en granulats à l'horizon 2001, 2006 et 2011 (estimations du VIIIème plan). [4]

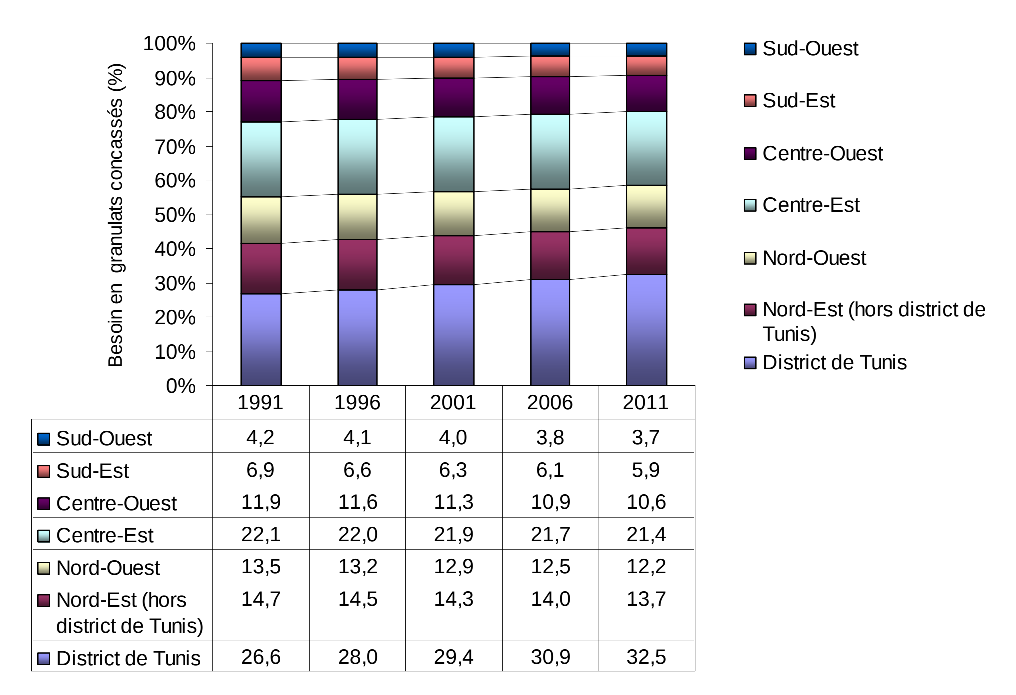
		1991	1996	*2001*	*2006*	*2011*
		Quantités (1000 m^3)				
Granulats concassés	District de Tunis	2088	2639	*3350*	*4271*	*5466*
	Nord-Est (hors district de Tunis)	1153	1367	*1624*	*1932*	*2304*
	Nord-Ouest	1061	1245	*1465*	*1732*	*2056*
	Centre-Est	1731	2074	*2489*	*2994*	*3607*
	Centre-Ouest	933	1091	*1281*	*1508*	*1781*
	Sud-Est	537	621	*720*	*840*	*986*
	Sud-Ouest	331	386	*451*	*531*	*627*
	Total	7835	9422	*11380*	*13807*	*16827*
Sables siliceux	District de Tunis	1420	1794	*2277*	*2902*	*3715*
	Nord-Est (hors district de Tunis)	650	756	*879*	*1023*	*1192*
	Nord-Ouest	528	597	*675*	*764*	*867*
	Centre-Est	1020	1206	*1428*	*1694*	*2012*
	Centre-Ouest	517	590	*674*	*771*	*883*
	Sud-Est	278	309	*343*	*383*	*427*
	Sud-Ouest	156	173	*193*	*214*	*237*
	Total	4569	5425	*6469*	*7751*	*9332*

Fig. I-7 : Évolution, par rapport à 1991, des besoins en granulats jusqu'à 2011, selon les prévisions du VIIIème plan.



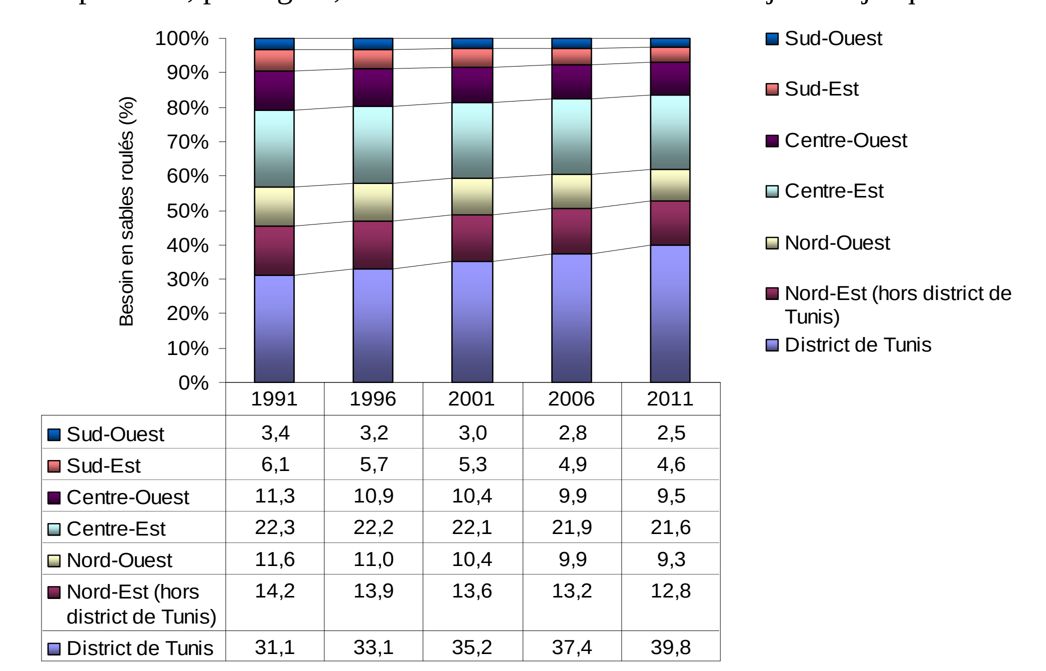
Un traitement numérique des données a permis d'apprécier, par région, l'évolution de la demande en granulats. Les résultats pour les granulats concassés et les sables roulés sont reportés sur les figures I-8 et I-9, respectivement. On constate que les prévisions des besoins du district de Tunis et de la région du Centre-Est sont assez élevées. Ces deux zones absorbent presque la moitié des besoins, alors que leur surface ne dépasse pas 15 % de la surface totale du territoire national. Cela confirme bien la place qu'occupent ces deux régions dans le développement économique et social du pays. Les besoins du secteur de la construction pour les autres régions apparaissent faibles, rapportés à leur surface. Enfin, en prenant comme référence les besoins en granulats (granulats concassés et sables roulés) de 1991, on remarque que les besoins de 2006 ont été majorés d'environ 74 % alors que ceux de 2011 de plus de 110 %.

Fig. I-8 : Répartition, par région, des besoins en granulats concassés. Projection jusqu'en 2011.



	1991	1996	2001	2006	2011
Sud-Ouest	4,2	4,1	4,0	3,8	3,7
Sud-Est	6,9	6,6	6,3	6,1	5,9
Centre-Ouest	11,9	11,6	11,3	10,9	10,6
Centre-Est	22,1	22,0	21,9	21,7	21,4
Nord-Ouest	13,5	13,2	12,9	12,5	12,2
Nord-Est (hors district de Tunis)	14,7	14,5	14,3	14,0	13,7
District de Tunis	26,6	28,0	29,4	30,9	32,5

Fig. I-9 : Répartition, par région, des besoins en sables roulés. Projection jusqu'en 2011.



	1991	1996	2001	2006	2011
Sud-Ouest	3,4	3,2	3,0	2,8	2,5
Sud-Est	6,1	5,7	5,3	4,9	4,6
Centre-Ouest	11,3	10,9	10,4	9,9	9,5
Centre-Est	22,3	22,2	22,1	21,9	21,6
Nord-Ouest	11,6	11,0	10,4	9,9	9,3
Nord-Est (hors district de Tunis)	14,2	13,9	13,6	13,2	12,8
District de Tunis	31,1	33,1	35,2	37,4	39,8

Une lecture plus détaillée des besoins [4] (chiffres non communiqués ici) montre que le secteur de la construction d'habitations, dont le béton hydraulique est l'élément prépondérant, est le principal consommateur des granulats dans toutes les régions. Notre travail de thèse s'inscrit donc bien dans ce cadre, puisque l'un de ses objectifs est de préserver les ressources granulaires destinées aux bétons de qualité.

I.2.4. Validation des prévisions des besoins en granulats concassés à l'échéance de 2006

Dans le but de valider les prévisions réalisées dans le cadre du VIIIème plan, la Direction Générale des Ponts et Chaussées a mis à notre disposition les données concernant le Xème plan (2001-2006) pour les besoins en granulats concassés [5], ainsi que les chiffres de production les plus récents (capacité de production théorique de 2006). Pour les travaux routiers, ces données sont fournies par région et par type de travaux. Pour les autres programmes (habitations et tourisme), seules les valeurs totales des besoins, par région, sont données. Jusqu'à ce jour, aucune étude sur la conformité de ces chiffres aux besoins réels n'a été établie.

I.2.4.1. Programme routier (Xème plan)

Le Xème plan (2001-2006) avait prévu, dans son programme routier, les actions suivantes :

- l'aménagement de 1650 km du réseau classé ;
- le renforcement en béton bitumineux du réseau classé sur un linéaire de 1250 km ;
- le comblement de lacunes du réseau classé par la réalisation de 340 km de tronçon routier ;
- la construction de 45 ouvrages (Ponts et tunnels) portant sur un linéaire de 3418 m ;
- la construction des voiries des villes et de leurs voiries structurantes. Il s'agit de la construction de 13 échangeurs, de 8 carrefours, de 12 interconnections, de 4 déviations et de 4 dédoublements de voies ;
- l'aménagement de 1000 km de pistes agricoles ;
- le revêtement de 1200 km de pistes agricoles ;
- la construction de 368,7 km d'autoroute.

Sur la base des quantités unitaires associées [5], (voir Tab. I-I), ces travaux devaient consommer au total environ 25 millions de m^3 de gravillons, soit 5 millions de m^3 par an. Le détail des calculs est donné dans le Tab. I-XI. Pour tenir compte des pertes qui peuvent se produire lors du transport et de la mise en oeuvre, la Direction des carrières et des Explosifs recommande une majoration de 15 % des besoins.

Les prévisions, par région, pour l'année 2006, sont présentées dans le Tab. I-XII. Elles sont complétées par celles du VIIIème plan [4]. L'ensemble est présenté sous forme d'un histogramme (Fig. I-10).

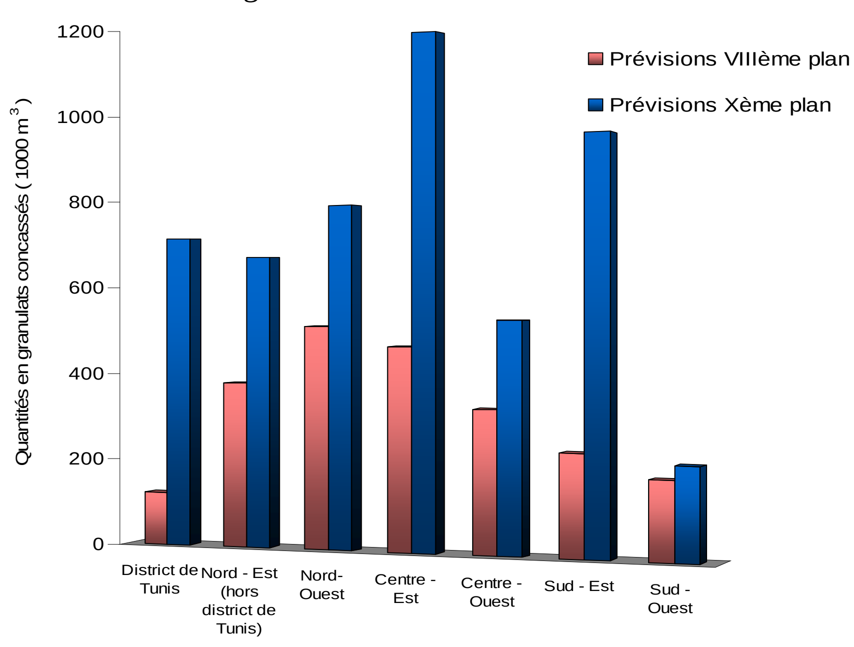
Tab. I-XI : Prévisions des besoins en granulats concassés (Xème plan) – Programme routier. [5]

Désignation	Linéaire (km)	Quantités unitaires (m^3)	Quantités totales (1000 m^3)
Aménagement du réseau classé	1650	3350	5527,5
Renforcement du réseau classé	1250	1740	2174,5
Comblement des lacunes du réseau classé	340	5300	1802
Construction des Ouvrages d'Art	3,418	16800	57,42
Construction des Voiries des villes et de leurs voiries structurantes	760	4145	3150
Aménagement des pistes agricoles	1000	2736	2736
Revêtement des pistes agricoles	1200	150	180
Construction du réseau autoroutier	368,7	17006	6270
Total	6572		21897
Total après majoration de 15 %			25182

Tab. I-XII : Prévisions du VIIIème et Xème plan pour les besoins en 2006 : granulats concassés – Programme routier (x1000m^3).

	District de Tunis	Nord-Est (hors district de Tunis)	Nord-Ouest	Centre-Est	Centre-Ouest	Sud-Est	Sud-Ouest	Total
Prévisions du VIIIème plan	120	380	512	467	328	235	180	2222
Prévisions du Xème plan	714	671	788	1178	528	944	121	4944

Fig. I-10 : Répartition, par région, des prévisions du VIIIème et Xème plan pour les besoins en 2006 : granulats concassés – Programme routier.



La comparaison de ces chiffres montre que les prévisions du Xème plan ont au total triplées par rapport à celles du XIIIème plan. Dans le détail, les besoins de travaux routiers pour le district de Tunis ont été multipliés par 6 (les consommations sont ici difficiles à

estimer en raison des travaux imprévus liés à une urbanisation souvent anarchique, qui couvre aujourd'hui près des 3/4 du district [5]). Les besoins pour la région Sud-Est ont été multipliés par 4. Ce facteur traduit le développement du secteur touristique dans cette région. Signalons enfin que les travaux de construction de l'autoroute M'Saken-Sfax, dans la région du Centre-Est, ont consommé la majeure partie de productions.

I.2.4.2. Autres programmes

Sur la base des estimations du Xème plan (2001-2006), les prévisions des besoins en produits de carrières pour la construction d'habitations et l'aménagement de zones associées ont été chiffrées à 28 millions de m^3 de granulats concassés [5], soit une consommation annuelle de 5,6 millions de m^3. Les chiffres prévisionnels du VIIIème plan, pour 2006 étaient de 8,7 millions de m^3, soit une augmentation de 36 % par rapport à ceux du Xème plan.

Pour le programme touristique, les estimations du Xème plan étaient d'environ 2,9 millions de m^3 de granulats concassés [5], soit une consommation annuelle de 0,58 million de m^3. Le récapitulatif de ces besoins, par région, est porté dans le Tab. I-XIII. Ce tableau est complété par les prévisions du VIIIème plan, échéance 2006. On note ici que le Xème plan n'avait pas prévu de besoins pour la construction de barrages. La Fig. I-11 reporte la répartition, par type de consommation (route, habitation et divers), des besoins de 2006 selon les deux plans. Il en est de même pour la Fig. I-12, qui concerne la répartition par région.

Tab. I-XIII : Prévisions des besoins de 2006 en granulats concassés (VIIIème et Xème plan). [4,5]

Région	Prévisions					
	VIIIème plan	Xème plan				
	(2006)	Route	Tourisme	Habitat	(2001-2006)	(2006)
	Quantités (1000 m^3)					
District de Tunis	4271	3571	295	8140	12007	2401
Nord-Est (hors district de Tunis)	1932	3356	44	4467	7868	1574
Nord-Ouest	1732	3942		2801	6743	1349
Centre-Est	1508	5890	1793	8405	16088	3218
Centre-Ouest	2994	2640		2242	4882	976
Sud-Est	531	4720	793		5513	1103
Sud-Ouest	840	1062		840	1902	380
Total	13807	25182	2926	28016	56124	11225

Fig. I-11 : Répartition, par type de consommation, des prévisions des besoins pour 2006 en granulats concassés (VIIIème et Xème plan).

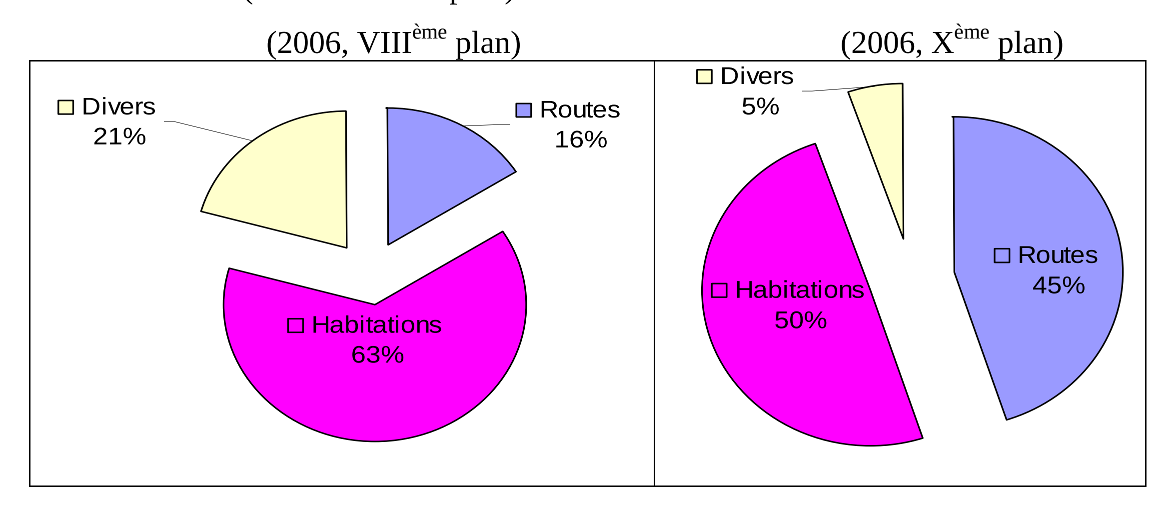
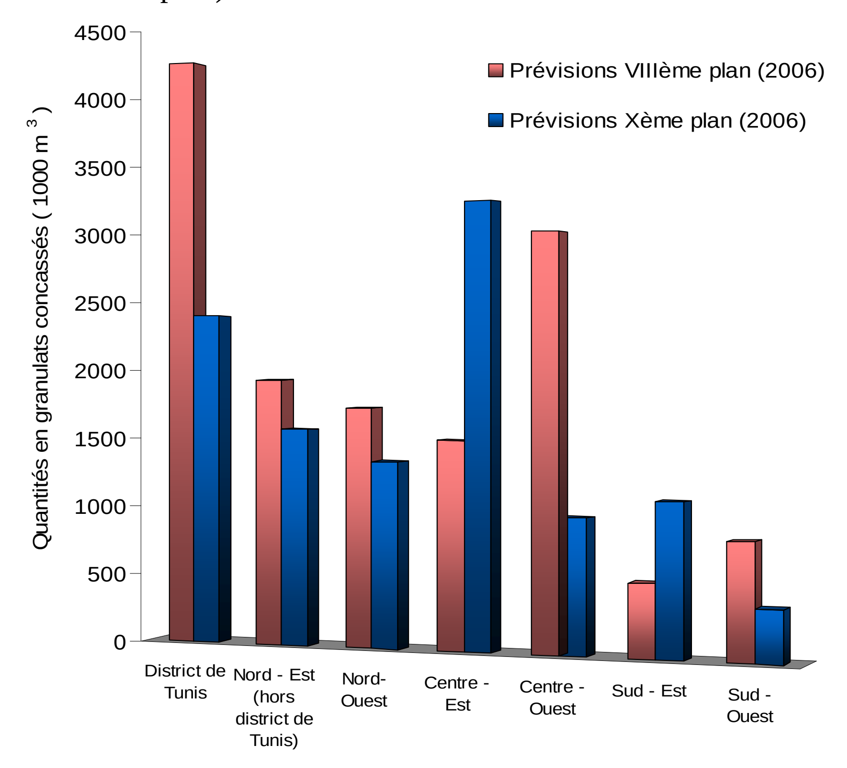


Fig. I-12 : Répartition, par région, des prévisions des besoins pour 2006 en granulats concassés (VIIIème et Xème plan).



Bien que les prévisions des besoins en granulats concassés pour les travaux routiers, à l'échéance de 2006, aient été sous estimés dans le VIIIème plan, par rapport au Xème plan, et que les répartitions des mêmes besoins par type de consommation, aient été, elles aussi, différentes, il s'avère que les tendances générales (besoins généraux en granulats concassés pour l'ensemble des programmes) sont cohérentes entre les deux plans. Les besoins pour le secteur de l'habitat (plus particulièrement les bétons) restent le principal pôle consommateur.

Entre les deux plans, la variation, est globalement de l'ordre de 20 %, ce qui constitue une bonne approximation pour un secteur difficile à maîtriser, compte tenu des variables de consommation. Toutefois, les nuances sont beaucoup plus marquées pour la région du Centre-Est, du Centre-Ouest et du district de Tunis.

Cette analyse, réalisée à partir des seules données disponibles, a fourni des ordres de grandeurs plutôt fiables pour situer les besoins en granulats issus de carrières et pour les sables de rivière. Il importe encore d'évaluer les moyens de productions actuels, ainsi que les ressources disponibles, avec leurs propriétés, pour statuer sur la recherche des gisements potentiellement capables de produire les granulats à béton de demain, pour la Tunisie.

I.3. Capacité de production et orientation du pays en matière de ressources granulaires

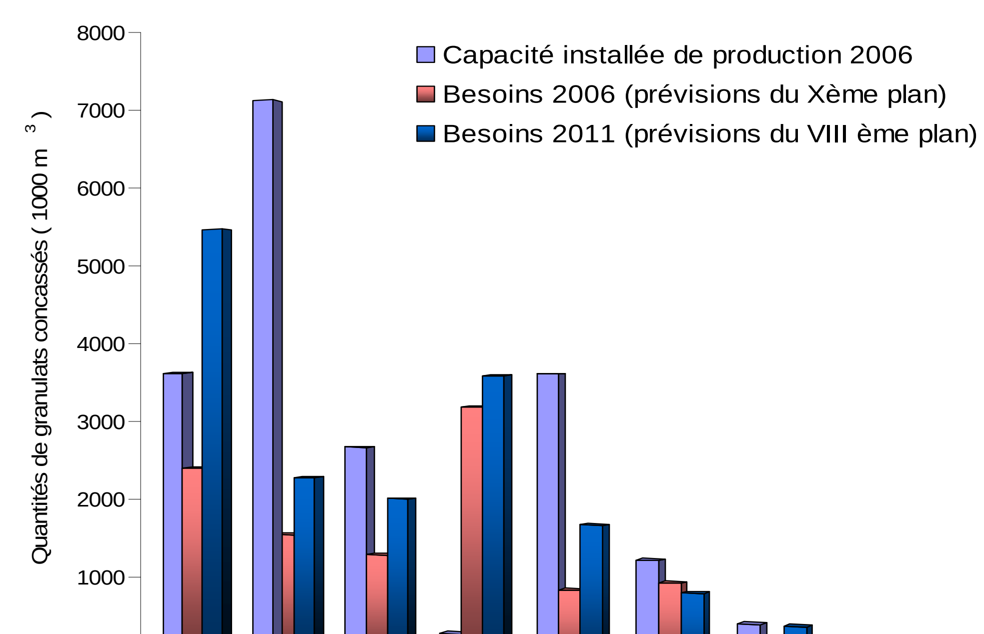
I.3.1. Prospective pour les granulats concassés

Pour les granulats concassés, le Tab. I-XIV présente les capacités de production installées dans chaque région, recensées en 1991 [4] et en 2006 [5]. Durant cette période, la capacité de production a augmenté globalement de 26 %, avec toutefois des différences significatives selon les régions, alors que la demande a augmenté de 43 % (en 1991, les besoins étaient de 7835.10^3 m^3 (Tab. I-X), elles sont de 11225.10^3 m^3 en 2006 (Tab. I-XIII)). Cela ne laisse pas à croire que les moyens de production à cette époque ne répondaient pas à la demande mais, au contraire, elles étaient toujours supérieures, en chiffres, à la demande, à l'exception de la région du Centre-Est. Le fait que la capacité de production, en 1991 (Tab. I-XIV), soit environ le double de la demande à la même échéance, crée une évolution de la demande, durant la période allant de 1991 à 2006, bien supérieure à l'évolution de la capacité de production. Le Tab. I-XIV rappelle aussi les prévisions des besoins formulées dans le cadre du VIIIème plan et du Xème plan, pour les échéances respectives de 2011 et 2006. Il présente enfin, pour les deux plans (i. e. des deux échéances), les différences qui apparaissent entre prévisions et capacités de production en 2006, globalement, et par région. Enfin, ces données sont reproduites sur la Fig. I-13.

Tab. I-XIV : Évolution des besoins par rapport à la capacité installée (granulats concassés).

Région	Capacité installée		Prévisions des besoins Xème plan		Prévisions des besoins VIIIème plan	
	1991	2006	2006	(prévision – capacité) 2006	2011	(prévision – capacité) 2006
	Quantités (1000 m^3)					
District de Tunis	6016	3620	2401	1219	5466	-1846
Nord-Est (hors district de Tunis)	4709	7105	1574	5531	2304	4801
Nord-Ouest	1543	2695	1349	1346	2056	639
Centre-Est	468	390	3218	-2828	3607	-3217
Centre-Ouest	840	3630	976	2654	1781	1849
Sud-Est	1536	1370	1103	267	986	384
Sud-Ouest	280	640	380	260	627	13
Total	15393	19450	11225	8225	16827	2623

Fig. I-13 : Histogramme des estimations des besoins par rapport à la capacité installée de 2006.



Dans le détail, les remarques suivantes peuvent être formulées (voir la carte Fig. I-1 pour le repérage des régions et des principales villes) :

- la région du Nord - hors district de Tunis -, le Centre-Ouest et les régions du Sud restent excédentaires jusqu'à l'horizon 2011, grâce aux carrières et aux capacités des installations de production existantes dans ces régions ;
- le district de Tunis, qui fournit actuellement des granulats aux zones avoisinantes, ne pourra plus couvrir ses propres besoins en 2011 si la situation reste inchangée. L'expansion urbaine, l'épuisement de certaines réserves et les surcoûts d'exploitation et de transport, dus notamment à la densité du trafic routier, sont les causes principales de ce futur déficit. Les exploitations en site urbain posent aussi des difficultés. Certaines carrières abandonnées sont déjà envahis par un urbanisme rampant et des lotissements nouveaux apparaissent au pied de front de taille encore en exploitation…

  Le plan directeur pour le secteur des carrières [4] prévoit par conséquent l'ouverture de nouvelles exploitations ou le renforcement d'autres encore peu exploités, dans la région du Nord-Est, pour pallier à l'approvisionnement futur de ce district. Les sites concernés sont géographiquement les plus proches du district de Tunis. Il s'agit particulièrement du gîte de Jbel Lansarine, à 25 km au Nord-Ouest de Tunis, non

encore exploité à ce jour. Toutefois, les autorisations d'ouverture d'une carrière à cet endroit sont conditionnées au renforcement des infrastructures routières reliant le site à l'agglomération voisine. La carrière de Jbel Ressas, à 30 km au Sud-Est de Tunis est une autre possibilité. Elle est encore peu exploitée, et sa production actuelle de granulats est déjà destinée en grande partie à la fabrication des bétons hydrauliques et bitumineux. D'autres possibilités d'ouvertures d'exploitation existent encore sur le flanc Nord-Est de la formation.

Le gîte de Nahli, peu exploité, est situé à 15 km au Nord-Est de Tunis. Il est caractérisé par un accès facile et son relief est en pente douce. Les granulats produits ont des teneurs en fillers assez élevées, plutôt argileux, et leurs performances mécaniques sont assez médiocres. Actuellement, les matériaux servent dans les structures de chaussées et dans les remblais ;

- la région du Nord-Est bénéficie d'une bonne infrastructure routière, favorable aux transports. De ce fait, elle restera toujours la zone d'approvisionnement privilégiée pour le Centre-Est même si les sites d'approvisionnements du Centre-Ouest sont plus proches. Par conséquent, l'ouverture éventuelle de nouvelles exploitations dans la région du Nord-Est devrait se faire dans sa partie la plus méridionale, sur les gîtes potentiels reconnus.

  La carrière de Aïn Tebournouk, par exemple, située à 35 km au Sud-Est de Tunis, à proximité de l'autoroute A1 et de la GP1, peut déjà constituer une ressource intéressante, à la fois pour les besoins de la région du Centre-Est et du district de Tunis. A l'horizon de 2020, de nouvelles exploitations pourraient être autorisées dans le secteur de cette carrière. Les produits extraits sont exploités actuellement pour les couches de fondation, voire les couches de base des chaussées. L'emploi des granulats de carrières pour la fabrication de bétons hydrauliques est marginal.

  Il en est de même pour le gîte de Jradou, situé à environ 80 km au Nord-Ouest des villes principales de la région du Centre-Est (Sousse, Monastir et Mahdia).

  A plus long terme, le MEHAT prévoit l'exploitation de nouveaux gisements, dans les gouvernorats de Ben Arous et de Zaghouan notamment [4], qui sont dotés de plusieurs gîtes intéressants, comme par exemple Jbel Boukornine à Ben Arous, ou encore Jbel Raouas, Jbel Fkirine et Ben Saïdane à Zaghouan. Ces gîtes devraient faire l'objet d'études de reconnaissances complémentaires ;

- la région du Nord-Ouest, grâce à ses gisements importants, peu couvrir sans problème les besoins, du moins jusqu'à l'horizon 2020. D'ailleurs, les carrières peuvent encore

se développer au fur et à mesure des besoins, grâce notamment à la forte capacité de production installée ;

- le Centre-Est, qui est actuellement fortement déficitaire, verra son déficit augmenter. Son approvisionnement en granulats continuera donc à se faire à partir des régions du Nord-Est (grâce au fret des camions revenant de Tunis) et du Centre-Ouest. A plus long terme, des exploitations à Jbel Garci et à Enfidaville (60 km au Nord de Sousse) sont envisagées [4] ;
- la région du Centre-Ouest, qui possède de nombreux gisements, constitue une ressource potentielle importante pour le développement de la région du Centre-Est, qui lui est proche géographiquement. Ainsi, la carrière de El Haoureb, à 100 km au Sud-Ouest de Sousse, qui exploite des calcaires dolomitiques puissants, ou de nouvelles exploitations dans ce secteur, peuvent alimenter en granulats la région du Centre-Est [4]. Les produits actuels entrent déjà dans la composition de certains bétons ;
- les régions du Sud-Est et du Sud-Ouest possèdent de nombreux gisements, mais les capacités de production actuellement installées sont plutôt faibles, par rapport à celles des autres régions (à l'exception de la région du Centre-Est). Un certain nombre de formations a été inventorié par le MEHAT, en prévision d'évolutions économiques éventuelles dans ces régions [4]. Ces ressources, non encore exploitées, constituent un potentiel pour le développement du Sud du pays. Il s'agit des :
    a. formations permiennes de Jbel Tebaga, près du village de Toujane (région de Medenine), marquées par des niveaux dolomitiques de 200 à 250 m de puissance,
    b. formations jurassiques de Jbel Tajra (région de Medenine), avec les calcaires de Krachoua, d'une épaisseur de 30 m et de grande extension géographique,
    c. formations crétacées (calcaires dolomitiques) qui forment la plateforme saharienne du Sud du pays. Dans le gouvernorat de Gafsa, elles affleurent à Jbel Jelabia, Jbel Ben Younès, Jbel Orbata, Jbel Idane, Jbel Bouhedma, Jbel Daoua, Jbel Kbir, Jbel Berdaa et dans la chaîne Nord des chotts (Jbel Naimia, Jbel Zitouna). Dans le gouvernorat de Gabès, elles affleurent à Jbel Dissa, Jbel Halloufa, El Hamma, Jbel Tabaga et Jbel Haïdoudi. Enfin, dans le gouvernorat de Medenine, elles affleurent aux Monts de Matmata, Jbel Mogar et Jbel Zrébib,
    d. formations éocènes, qui affleurent dans la région de Gafsa au niveau des chotts.

- La capacité de production installée dans les carrières, si elle reste constante, verra son taux d'utilisation passer de 58 % en 2006 à 87 % en 2011. Elle permettra donc de répondre globalement aux prévisions des besoins du pays à l'horizon 2011. Toutefois, ces ratios ne sont pas identiques selon les régions, dont certaines, comme celle du district de Tunis ou du Centre-Est sont, ou seront, sous-équipées à termes. Notons enfin que l'implantation de nouvelles exploitations à des distances éloignées des centres de consommations n'est pas une solution économiquement viable, compte tenu des coûts de transport, très vite prohibitifs.

I.3.2. Prospective pour les sables roulés

Les besoins en sables alluvionnaires roulés utilisés dans le secteur de la construction sont actuellement satisfaits dans chaque région. Les prélèvements sont effectués soit dans les gîtes sédimentaires (carrières naturelles), soit par les dépôts récents d'érosion (alluvions des lits d'oueds et dépôts éoliens), dont les réserves ne sont pas inépuisables. Toutefois, les capacités actuelles de production sont insuffisantes pour couvrir les besoins à l'horizon 2011. C'est pourquoi l'administration recommande de recourir, si possible, aux sables de carrières (riches en fillers), pour certains usages en bâtiment ou pour la viabilisation [4].

Pour la ressource potentielle de El Khlédia, le MEHAT recommande d'établir des études de reconnaissances complémentaires visant à établir un plan d'exploitation permettant :

- de délimiter les zones exploitables, avec les accès ;
- d'évaluer les réserves ;
- de définir le ou les modes d'exploitation possibles en tenant compte de l'environnement ;
- éventuellement d'esquisser un plan de réhabilitation des pistes et une étude d'impact comprenant les modalités de remise en état des lieux ;
- la création d'un groupement d'exploitants pour la maintenance et la gestion de l'ensemble des gîtes, sous la direction de sa tutelle.

I.4. Influence du coût de transport

Toute nouvelle ouverture d'exploitation de granulats est accompagnée d'une étude de marché intégrant la distance moyenne de transport entre le lieu de production et le secteur de livraison. Signalons dans ce cadre que le transport de produit ne fait pas l'objet d'une tarification réglementée [12], mais qu'il est négocié librement entre le transporteur et le client**.** Pour illustrer l'impact du coût de transport sur le prix de vente de ces produits, on a pris l'exemple concret de la région de Tunis pour laquelle les prix des granulats rendus sur chantier sont connus. Le Tab. I-XV présente, pour un même produit de carrière - un tout venant TV 0/20 -, les prix de vente rendus à Tunis en provenance des carrières de Nahli, de Jbel Ressas et de Aïn Tebournouk. Il donne notamment la part attribuée au transport ainsi que le prix par kilomètre correspondant au transport de 1m^3 de ce produit.

Tab. I-XV : Coût de transport d'un TV 0/20 rendu dans la région de Tunis en provenance de divers sites (en Dinars Tunisiens DT).

Lieu de Provenance	Quantité	Prix de vente (rendu à Tunis)	Prix unitaire	Prix en carrière	Prix de transport	Distance à Tunis	Prix / km	Augmentation
	(m^3)	(DT)	(DT/m^3)	(DT/m^3)	(DT/m^3)	(km)	(DT/m^3/km)	%
Nahli	10	126	12,6	5	7,56	15	0,504	60,2
Jbel Ressas	10	132	13,2	5	8,156	30	0,272	62
Aïn Tebournouk	10	144	14,4	5	9,352	35	0,267	65,2

On constate, pour un même prix départ carrière, que le coût de transport représente plus de 60 % du prix de vente de ce produit, avec des nuances selon les zones d'approvisionnement. Un éloignement supplémentaire des carrières par rapport à la région de Tunis, d'une distance de 60 km par exemple, augmenterait le coût de granulats d'environ 80 %, soit 5,5 dinars/m^3. C'est le cas, peu fréquent, des approvisionnements en provenance de la carrière de Jradou. Cette augmentation engendrerait, par exemple, une augmentation sur le coût de construction d'une habitation populaire de 2 dinars par m^2 construit, et de 0,6 dinars par m^2 celui d'une habitation de standing. Par contre, pour les travaux routiers d'envergure, un surcoût de transport est souvent évité par les entreprises adjudicatrices, qui optent généralement vers l'ouverture d'une exploitation occasionnelle à proximité du chantier pour, par la suite, l'abandonner après achèvement des travaux. Mais, en tout état de cause, l'éloignement des lieux de production conduit à une augmentation des prix de vente.

Pour limiter cet inconvénient, plusieurs programmes de recherche ont été menés par la Direction des Carrières et des Explosifs pour envisager une utilisation optimale et rationnelle des matériaux locaux. Un de ces programmes visait la substitution des granulats siliceux utilisés dans la construction (travaux routiers, bétons hydrauliques) par les calcaires régionalement abondant. Différentes recherches universitaires associées à ce programme [13,14] ont montré que la valorisation dans les bétons hydrauliques des sables de concassage produits en grande quantité dans les carrières, en substitution partielle ou totale des sables siliceux, devait permettre de réduire les coûts de transport des matières premières de moitié et, par conséquent, le prix de vente des bétons du quart de celui prévu initialement. Pour information, le Tab. I-XVI présente la tarification tunisienne du transport des marchandises en 1989.

Tab. I-XVI : Tarification générale du transport des marchandises (1989) (en Dinars Tunisiens DT). [12]

Distance	≤10 tonnes	> 10 tonnes
≤ 30 km	3,500 DT/tonne	2,800 DT/tonne
> 30 km	3,500 DT/tonne pour les 30 premiers km 0,061 DT/tonne/km pour la distance restante	2,800 DT/tonne pour les 30 premiers km 0,047 DT/tonne/km pour la distance restante

I.5. Origine, nature et qualité des roches exploitées en Tunisie

L'histoire géologique de la Tunisie est marquée par le dépôt de diverses formations, à différentes époques. Les plus exploitées sont les formations sédimentaires carbonatées et siliceuses (sables et grés). Les formations silico-alumineuses (argiles) sont moins développées, et les formations éruptives (granites, diorites, basaltes) et métamorphiques (marbres, gneiss, micaschistes, calcoschistes) sont rares et peu exploitées. Les quelques pointements volcaniques dans les gouvernorats de Bizerte et de Béja, et l'affleurement du Permien marin, unique en Afrique (Ere Primaire), situé à Medenine, ont des caractéristiques intéressantes, mais ne peuvent pas être exploités car ils sont classés en site géologique [15].

Une description des formations sédimentaires est donnée dans l'inventaire général du pays en matière de substances utiles [4]. Cet inventaire est complété par les caractéristiques mécaniques des granulats de chaque faciès [6]. Ces résultats peuvent être complétés par les résultats des analyses chimiques des roches prélevées dans certains gisements en exploitation [7].

I.5.1. Formations carbonatées (calcaires et dolomies)

Les formations sédimentaires carbonatées tunisiennes vont de la fin de l'ère primaire jusqu'au quaternaire. Elles présentent des caractéristiques lithologiques très variables [4]. On distingue :

- les affleurements calcaires jurassiques localisés au Nord-Est et dans le Sud tunisien. Ce sont les faciès les plus recherchés pour fabriquer les bétons industriels, les couches de roulement des chaussées et les ballasts, car ses produits sont connus par leur dureté, leur angularité et leur propreté. Les réserves en carrières sont loin d'être épuisées et la production n'atteint pas les capacités industrielles installées. On peut distinguer 4 zones, du Nord au Sud :
  a. les reliefs de Jbel Ichkeul, Jbel Haïrech et Jbel Mayana. Ces formations sont caractérisées par trois types de faciès : un calcaire à grains fins, très durs, avec intercalations de marnes schisteuses, une dolomie massive et des calcaires dolomitiques gris très durs. Vers l'Ouest se développent soit des dolomies dures de

couleur rose en partie recristallisées, soit des calcaires bitumineux noirs à patine grise, compacts, très durs et à cassure esquilleuse,

b. les reliefs de la dorsale tunisienne qui s'alignent le long de l'accident majeur tunisien. Trois types de faciès peuvent être distingués : un calcaire gris, un calcaire massif et un calcaire para-récifal,
c. la Tunisie centrale avec des bancs bien individualisés de calcaires dolomitiques puissant de 300 à 400 m qui s'affleurent principalement dans la région de Kairouan,
d. le Sud de la Tunisie où, dans la région de Medenine, de grandes étendues calcaires affleurent en falaises ;

- les affleurements crétacés et éocènes, qui présentent des caractéristiques physiques et chimiques proches de celles des formations jurassiques, et qui sont assez développés dans le pays. Les faciès sont généralement silicoclastiques (caractéristiques de dépôts de mer ouverte), surtout dans la partie septentrionale de la Tunisie. Les calcaires dolomitiques de ces affleurements constituent des gisements potentiels pour la production de granulats ;
- les affleurements quaternaires des régions de Zaghouan et du sahel (région du Centre-Est, hors gouvernorat de Sfax), caractérisés par des calcaires en croûtes peu épais, riches en quartz, dont les qualités physiques et chimiques sont médiocres. Ils sont exploités dans ces régions, où les calcaires massifs font défaut.

Le Tab. I-XVII présente, par région, un inventaire de ces formations carbonatées. Il est complété par les fourchettes de valeurs de Los Angeles (LA) et de micro-Deval (MDE et MDS) mesurées sur les granulats fabriqués par les carrières en exploitation dans ces faciès. Les compositions chimiques de la roche de certains gisements sont portées dans le Tab. I-XVIII.

L'analyse de ces données montre que la qualité des roches varie sensiblement, non seulement selon les faciès, mais aussi selon les régions, ce qui pose des difficultés de suivi des qualités mécaniques et minéralogiques. Par ailleurs, on constate, pour certaines roches, la présence d'un taux plutôt élevé de MgO (Oxyde de Magnésium) et de silice. Ces constituants peuvent créer des réactions en présence de certains ciments (réactions alcali-silice et alcali-carbonate).

Tab. I-XVII : Inventaire des ressources minérales carbonatées de la Tunisie et valeurs de LA et de MD relatives aux granulats issus des différents faciès. [6]

Région	Sites	Formations	Faciès	LA		MDE		MDS	
				inf.	sup.	inf.	sup.	inf.	sup.
Nord-Est	J. Oust, J. Bouhamida, **J. Ressas**, J. Mayana, Hammam Jedi	Jurassique, formation Nara	Dolomie, calcaire dolomitique	18	23	11	12	3,5	4,5
	Birine, J. Bouhadid, **Nahli**, **Aïn Tebournouk**, J. Ayari, J. El azzag, J. Ouakir, Bechateur	Crétacé supérieur, formation Abiod	Calcaire blanc peu gréseux, calcaire mar-neux, marno-calcaire	20	30	10	12	3	3,1
	Jradou, **J. Lansarine**, Mateur, **Tahent**, Boubbouch Ziba, J. Baccar	Eocène, formation Boudabbous, formation Metloui	calcaire à globigérines à nummulites, calcaire peu gréseux	20	30	10	12	3	4,5
	El Haouaria	Thyrhénien, formation Rejiche	Calcaire crayeux gréseux, oolithique	>35					
Nord-Ouest	J. Zaress, J. Ichkeul, J. Hairech	Jurassique, formation Nara	Dolomie, calcaire dolomitique	18	20				
	J. Serj, J. Touiref, Tajerouine	Crétacé sup., formation Serdj	Calcaire dolomitique	23	26	23	32	7	8
	J. Sidi Shili, J. Majen Ammar, Siliana, Ouest de Teboursouk, Kef, El Hrir, Krib	Crétacé supérieur, formation Abiod, Campano-Maestrichien	Calcaire peu gréseux, calcaire blanc	23	35	22	30	8	11
	J. Rabiâa, J. Sidi Ahmed Zarrouk, Nefza, Tabarka, J. El Menchar, J. S. Gassem, J. Dl Menchar, Halk Ennab, Aîn El Acha, Dahmani, J. Bougrine	Eocène inférieur, formation Metloui, formation Boudabbous	Calcaire à globigérines à nummulites, calcaire peu gréseux, calcaire peu dolomitique	18	29	17	32	6	9
Centre-Est	J. Garci	Jurassique, form. Nara	Dolomie	20	24				
	J. Aîn rahma	Crétacé supérieur	Calc. peu gréseux, calc.	25	30	27	28	8	
	J. M'dhaker, J. Bayadi	Eocène sup. (Companien), Abiod	Calcaire peu gréseux	25	30	10	12	3	4,5
	Route de Gramda, Taniour, Tunis, Mahdia	Enc. villa-franchienen, Carapace de pomell	Calcaire crayeux gréseux, oolithique						
	Rejiche, El Bradâa, Zegana, Ezzahra, Khammara, Bekalta	Thyrrhénien	Calcaire peu gréseux oolithique	>35					
Centre-Ouest	**El Haoureb**, J. Faêdh	Jurassique, formation Nara	Dolomie	18	21	12	12	4	4,2
	J. El Kabar, J. Mellousi, J. Goubrar, J. Gouiet, J. Semmama, Sidi Bouulâaba, J. Châambi, J. El Koumine, J. Sidi Atach	Crétacé inférieur et moyen, formation Zebbag, formation Serdj	Calcaire dolomitique	20	23	11	12	4	5
	Rouisset, El Baten, Chbika, J. Fernana, J. Mazzouna	Crétacé sup. (compa-nien), Campano-Moestrichtier,f. Abiod	Calcaire peu gréseux, calcaire crayeux	35	40	10	11	3	3,1
Sud-Est	J. Tejra, J. Krachaoua, Alentours de Tataouine, J. Dissa	Jurassique, formation Nara	Dolomie, calcaire dolomitique	19	25	10	12	3	4
	J. Haitouiti, J. Aziz, J. Haddada, J. Halougue	Crétacé inf. et moyen, formation Bouhedma	Calcaire dolomitique	22	25	10	12	3	4,5
	El Grine Jenaych, Hissiene, Jdaria, Bahiret El Bibène	Thyrrhénien	Calcaire détritique grés à ciment calcaire	>35					
Sud-Ouest	J. Bouhedma, J. Sidi Aich, J. Jelabia, J. Orbata, J. Safaya	Crétacé inférieur, formation Zebbag	Calcaire dolomitique	21	25	20	22	8	12
	J. Bouramli, J. Ben Younès, J. Saidane	Crétacé supérieur, formation Abiod	Calcaire gréseux peu dolomitique	24	30	21	30	8	11
	J. Safaya, Extrème Nord de Tozeur	Eocène, f. Metloui	Calcaire gréseux	25	40	25	35	8	12

J. : Jbel, inf. : inférieur, sup. : supérieur, Enc. : Encroutement, Calc. : calcaire, f. : formation

Tab. I-XVIII : Composition chimique de la roche de différents gisements, teneurs en %. [7]

Roche	$CaCO_3$	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	CaO	SiO_2	SO_3	P.F
J. Ressas	94-97	0,04-0,2	0-0,25	0,6-0,75	0-0,05	0,02-0,07	51-53	0-0,8	0,1-0,35	43-44
Nahli	84-94	0,2-0,3	0,6-3	0,19-0,24	0,13-0,16	0,02-0,04	47-52	3,5-4,5	0,1-0,5	37-42
Tajera	88-92	1,15-1,20	0,31-0,4	6-8	0,3-0,5	0,01-0,03	40-45	2,1-2,5	0,03-0,05	45-46
J. Mayana	94-96	0,05-0,07	0,05-0,06	0,27-0,35	0,03-0,04	0 -0,03	52-53	0,2-0,3	0,0-0,02	42-43
El Haoureb	85-92	0,3-0,4	0,6-0,8	8-12	0,26-0,3	0,06-0,1	45-52	1,2-1,5	0,04-0,05	38-39

$CaCO_3$: carbonate de calcium; Fe_2O_3 : oxyde de fer ; Al_2O_3 : oxyde d'aluminium ; MgO : oxyde de magnésium; K_2O : oxyde de potassium ; Na_2O : oxyde de sodium; CaO : oxyde de calcium ; SiO_2 : oxyde de silicium ; SO_3 : oxyde de soufre; P.F : perte au feu

I.5.2. Formation siliceuse (sables roulés)

En se référant à la série litho-stratigraphique de la Tunisie [7], on constate que les formations sableuses sont de nature et d'origine géologique très diverses. Selon leur histoire géologique, ces sables se distinguent les uns des autres par différents aspects : granulométrie, teneur et nature des fines, nature minéralogique, angularité, dureté, présence de matières humides, etc. Ces formations résultent d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation comportant, à des degrés divers, une décomposition sur place des roches originelles suivie d'un transport fluvial et parfois éolien [16]. Ces processus agressifs conduisent à ce que les formations sableuses tunisiennes ne contiennent pratiquement que du quartz, qui est un minéral dur, résistant et quasi inaltérable.

Selon la nature et l'importance du transport, les grains de quartz présentent différents aspects : émoussés et luisants lorsque le transport est dû à l'eau (rivières, zones côtières), ronds et mats si le transport est éolien (régions du sud), et non usés si pas de transport.

Les études menées par [7] ont permis de bien connaître les caractéristiques géométriques, physiques et chimiques des principaux gisements sableux de Tunisie. Nous reprenons dans les Tab. I-XIX et I-XX les résultats marquant de cette étude. Leur analyse, complétée par des communications privées avec l'auteur, conduisent aux remarques suivantes :

- les formations sableuses tunisiennes sont riches en silice (96 à 98,6 %), avec des teneurs en oxyde de fer variables de 0,1 à 0,7 %. Les granulométries sont plutôt fines à moyennes ;
- certaines formations ont des passées argileuses, limoneuses ou de matières colloïdales (ES $\leq$ 60). L'essai au bleu de méthylène est alors préconisé. L'utilisation de ces sables dans les bétons hydrauliques risque de générer des problèmes de retrait ou de gonflement ;

- les teneurs en alcalins actifs (Na_2O et K_2O) sont assez variables (0,003 à 0,03 %). La norme tunisienne spécifie une valeur inférieure à 0,01 % [17]. Certains sables peuvent donc favoriser des réactions alcali-silice en présence du ciment. Il importe alors de s'assurer du non réactivité du sable en présence du ciment, choisi pour la fabrication des bétons.

Tab. I-XIX : Caractéristiques physiques et géométriques des sables de différents sites de production. [7]

Région	Gouvernorat	Lieu de provenance	MVR (T/m^3)		MVA (T/m^3)		ES (%)		Fillers %		MF	
District de Tunis	Ariana	Borj El Amri	2,58	2,62	1,5	1,69	41	78	2	10	1,3	1,80
	Ben Arous	**El Khlédia**	2,52	2,62	1,4	1,67	24	84	8	2	1,32	2,18
Nord-Est (hors district de Tunis)	Nabeul	Borj Hfaiedh	2,54	2,65	1,53	1,58	69	88	4	8	1,02	2,34
		Menzel Temime	2,60	2,65	1,55	1,63	85	90	1	4	1,20	1,67
	Zaghaouan	Bir M'Charga	2,58	2,63	1,66	1,7	70	73	9	14	1,35	1,96
	Bizerte	Metline	2,60	2,63	1,5	1,55	82	84	1	1	1,11	1,11
		Shiri Sejnène	2,60	2,65	1,51	1,58	90	95	1	2	1,28	1,72
Nord-Ouest	Béja	Ouechtata	2,54	2,60	1,34	1,50	38	76	2	12	1,10	1,30
	Siliana	Bou Arada	2,62	2,64	1,45	1,62	90	96	1	3	2,00	2,52
Centre-Est	Sousse	Zouaouine	2,54	2,60	1,34	1,52	70	84	1	2	0,55	1,20
	Sfax	Chaffar	2,6	2,65	1,53	1,62	55	84	2	5	1,62	2,33
Centre-Ouest	Kairaoun	El Alaa	2,58	2,63	1,40	1,57	60	85	2	7	1,53	2,20
		Oueslatia	2,6	2,65	1,35	1,6	50	90	3	6	1,22	2,10
Sud-Est	Tataouine	Douiret	2,5	2,63	1,52	1,60	65	90	1	3	1,81	2,57
	Medenine	Gribis	2,53	2,62	1,37	1,54	38	80	3	11	1,12	1,78
	Gabès	Ouedhref	2,57	2,64	1,45	1,59	59	79	1	5	1,42	1,92
Sud-Ouest	Gafsa	Boudinar	2,62	2,65	1,52	1,62	70	95	2	5	1,72	2,53

Tab. I-XX : Composition chimique des sables de différents sites de production, teneurs en %. [7]

Région	Gouvernorat	Lieu de provenance	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O	CaO	TiO_2	P.F
District de Tunis	Ariana	Borj El Amri	98,63	0,11	0,26	0,01	0,15	0,03	0,06	0,009	1,36
	Ben Arous	**El Khlédia**	97,4	0,55	0,6	0,03	0,14	0,06	0,18	0,18	0,32
Nord-Est (hors district de Tunis)	Nabeul	Borj Hfaiedh	96,97	0,07	0,21	0,4	0,07	0,1	0,85	0,003	1,3
	Zaghaouan	Bir M'Charga	98,31	0,11	0,03	0,01	0,17	0,02	0,07	0,01	1,68
	Bizerte	Metline	96,16	0,23	0,34	0,07	0,06	0,05	1,3	0,1	0,16
		Shiri Sejnène	96,97	0,2	0,34	0,05	0,05	0,06	0,99	0,07	0,32
Nord-Ouest	Béja	Ouechtata	97,17	0,34	0,64	0,05	0,06	0,06	0,28	0,03	0,43
	Siliana	Bou Arada	97,8	0,4	0,45	0,03	0,15	0,02	0,2	0,3	0,32
Centre-Est	Sousse	Safha Sidi Chérif	95,5	0,7	1,2	0,3	0,08	0,1	0,1	0,1	0,438
Centre-Ouest	Kairaoun	El Alaa	96,9	0,28	0,67	0,06	0,27	0,03	0,45	0,06	0,32
Sud-Est	Tataouine	Douiret	97,3	0,53	0,43	0,05	0,1	0,02	0,23	0,04	0,16
Sud-Ouest	Gafsa	Boudinar	98,45	0,11	1,02	0,05	0,75	0,27	0,01	0,002	0,54

TiO_2 : Oxyde de titane

I.5.3. Conclusion

L'étude minéralogique et pétrographique des roches qui affleurent en Tunisie (massives ou meubles), et dont sont tirés les granulats, a permis de montrer qu'elles présentaient une large étendue de caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques. La plupart des formations sont de nature carbonatée. Elles sont largement présentes sur le territoire national et leur qualité est généralement bonne, excepté pour quelques affleurements du quaternaire, qui ne sont pas aptes à former des granulats à béton de premier choix. La plupart des autres formations peuvent donner des granulats pour les ouvrages courants en béton, voire pour des ouvrages performants. La qualité des granulats dépend aussi, dans une certaine mesure, des techniques de fabrication. La nature géotechnique du matériau et son mode d'élaboration ne peuvent être dissociés, car une roche ayant des bonnes caractéristiques intrinsèques ne donne pas systématiquement un bon granulat [18]. Par contre, une roche possédant des propriétés moyennes peut donner un granulat de choix, s'il a été judicieusement élaboré. Dans le but de réaliser des ouvrages en béton de qualité, la Tunisie élabore actuellement un projet de norme [19], inspiré de la norme européenne [20], dont les spécifications s'appliqueront aux granulats de béton de demain.

I.6. Conclusion : sélection des formations pour l'étude

Le territoire tunisien présente une grande variété de gisements potentiellement aptes à donner des granulats à béton. Cependant, et selon les orientations stratégiques du pays en matière de ressources granulaires, certains gisements présentent un intérêt fondamental pour le développement durable du secteur de la construction de certaines régions. Les prospectives analysées pour les granulats concassés, en fonction de la capacité actuelle de production par région, ont montré que seul le district de Tunis et la région du Centre-Est présenteront un déficit de production à l'horizon 2011.

Pour le district de Tunis, ce déficit est dû essentiellement à l'expansion urbaine et au développement économique et social de cette région. Par conséquent, le Ministère de l'Equipement de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire a défini les gisements de Jbel Lansarine, Jbel Ressas, Nahli et Aïn Tebournouk comme sources d'approvisionnement privilégiées pour ce district. Ces formations ont ainsi fait l'objet de notre étude dont le but premier est de vérifier la faisabilité de mélanges hydrauliques avec leurs productions actuelles de ces carrières. Cependant, en l'absence d'exploitations en activité sur le gisement de Jbel Lansarine, c'est celui de Tahent, situé à proximité et dans la même formation géologique (prolongement des chaines montagneuses de Jbel Lansarine) qui a été retenu.

Quand à la région du Centre-Est, le déficit de production est dû essentiellement à l'absence de ressources capables de donner des granulats pour satisfaire ses besoins. Le MEHAT recommande, à l'horizon 2011, de recourir aux gisements de El Haoureb et de Jradou pour combler ce déficit. Ces deux carrières complètent ainsi notre étude.

Enfin, le gîte de El Khlédia, qui produit un sable siliceux roulé fin, a été sélectionné pour l'élaboration de mélanges hydrauliques mixtes.

I.7. Références bibliographiques

[1] Chattaoui H., 1993, "Les vibrations dues aux tirs d'explosifs", Séminaire sur la gestion et l'exploitation des carrières, Tunis, 15 et 16 Février, 11 p.

[2] Ministère de l'Équipement et de l'Habitat - Direction des Carrières et des Explosifs, 2000, "Contrôle et assurance de la qualité", Séminaire sur les matériaux de construction, Tunis, 2 et 3 Mai, 17 p.

[3] UNICEM, 2000, "Le marché des granulats en 2000", Rapport du service statistique, Paris, Janvier, 4p.

[4] Ministère de l'Équipement et de l'Habitat - Direction des Carrières et des Explosifs, 1994, "Plan directeur pour le secteur des carrières", Rapport global de SOTINFOR/SERAH, Décembre.

[5] Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire – Direction Générale des Ponts et Chaussées, 2001, "Projet Xème Plan - Routes et Ponts", Version PXN2, 5 Juillet.

[6] Ministère de l'Équipement et de l'Habitat - Centre d'Essais et Techniques de la Construction, 1991, "Atlas des matériaux calcaires".

[7] Added M., 2005, "Impact de la qualité des granulats sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers et des bétons", Thèse de Doctorat de la Faculté des Sciences de Tunis.

[8] CTMCCV, 1989, "Production et qualité dans les carrières de roches massives à ciel ouvert", Bulletin de CTMCCV, N°7, Décembre.

[9] Nouaili L., 1993,"Granulats en Tunisie - Qualité et méthode de fabrication", Séminaire sur la gestion et l'exploitation des carrières, Tunis, 15 et 16 Février.

[10] Ben Soltane S., 1993, "Localisation des carrières", Séminaire sur la gestion et l'exploitation des carrières, Tunis, 15 et 16 Février, 3p.

[11] Jouirou M., 1993, "Potentialités de la Tunisie en matière de granulats", Séminaire sur la gestion et l'exploitation des carrières, Tunis, 15 et 16 Février, 11 p.

[12] Ministère de Transport, 1989, "Tarification générale de transport de marchandise", Arrêté du Journal Officiel de la République Tunisienne, 29 Août, p. 840.

[13] Zennir A., 1996, "Bétons calcaires en Lorraine – Utilisation des granulats du Bajocien de Viterne pour la formulation de bétons courants", Thèse de doctorat de l'UHP soutenue le 25 Juin 1996.Voirin J., 2004.

[14] Voirin J., 2004, "Utilisation des calcaires du Bajocien Lorrain en technique routière", Thèse de doctorat de l'UHP soutenue le 24 Juin 2004.

[15] Guesmi M., 2000, "Qualité et méthode d'élaboration des granulats", Séminaire sur la gestion et l'exploitation des carrières, Tunis, 2 et 3 Février, 11 p.

[16] Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement, 1987, "Synthèses - les sables : Guide pratique d'utilisation routière", N° TE 230.C43.

[17] Norme NT 21.30, 2002, "Granulats - Définitions, Conformités, Spécifications", INNORPI.

[18] Aïtcin P.C., Jolicoeur G., Mercier M., 1992, "Technologie des granulats", Cours de l'Université de Sherbrooke, p10.

[19] Projet de Norme PNT 21.1995, 2002, "Béton - Partie 1 : Spécification, performance, production et conformité", INNORPI.

[20] Norme NF EN 12620, 2000, "Granulats pour bétons", AFNOR.

Chapitre II

Étude des constituants utilisés dans les mélanges hydrauliques

II.1. Introduction

Le présent chapitre s'intéresse à l'identification des matériaux fournis par les partenaires.

Il rappelle tout d'abord l'origine géologique des roches mères dont sont issus les granulats, ainsi que les différents faciès constituant ces roches. Le choix de la cimenterie et du type du ciment est justifié également à ce stade.

Ce chapitre présente ensuite les propriétés des matériaux de l'étude. Pour les granulats, des essais de caractérisation usuels, pratiqués selon les normes tunisiennes ou AFNOR en vigueur, ont permis de définir les propriétés physico-mécaniques de ces produits. Ils ont permis également d'apprécier la qualité de ces matériaux au regard des spécifications actuelles pour un usage dans les bétons. Des mesures complémentaires de compacité réalisées selon un protocole conventionnel du LCPC ont été pratiquées sur l'ensemble des fractions granulaires. Divers laboratoires ont participé à la réalisation de ces essais. Il s'agit du laboratoire LGC de l'ENIT, du laboratoire CETEC du MEHAT, du laboratoire GRMC et du laboratoire SIKA. Certaines mesures de masses volumiques et d'absorption d'eau ont fait l'objet de mesures répétées (6 en général), notamment pour les sables de Aïn Tebournouk et de Nahli, en raison des difficultés de mise en œuvre inhérentes à ce type d'essais.

Pour le ciment, certaines données ont été fournies par le cimentier. Il s'agit de la composition chimique, de la granularité, de la densité, et de la classe de résistance. La composition chimique a permis, par application des formules de Bogue, de calculer le taux des principaux constituants du clinker. Pour la classe de résistance du ciment, les valeurs communiquées ont été vérifiées expérimentalement ; d'autres ont été ajustées selon le modèle du LCPC (voir chapitre III).

II.2. Matériaux utilisés

II.2.1. Introduction

Comme cela a déjà été défini au paragraphe 6 du chapitre précédent, le choix des carrières retenues pour cette étude est associé à une recommandation du Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire, qui définit les orientations stratégiques du pays en matière de ressources granulaires. Ainsi, sept carrières calcaires ont été sélectionnées pour vérifier la faisabilité de bétons hydrauliques avec leurs productions actuelles. Il s'agit des carrières de Aïn Tebournouk, de Nahli, de El Haoureb, de Jbel Ressas, de Jradou, de Tahent et de El Khlédia. L'origine géologique, les différentes formations rencontrées dans les gisements ainsi que les coupures granulométriques fournies par carrière, sont détaillées dans les paragraphes qui suivent. La situation géographique de ces carrières est repérée sur la carte reproduite à la Fig. II-1.

Le ciment choisi pour l'étude est celui utilisé par les industriels de la région du district de Tunis.

Fig. II-1 : Localisation des carrières tunisiennes étudiées.



II.2.2. Roches exploitées -Aspects géologiques

II.2.2.1. Aïn Tebournouk

La carrière, située à proximité de Grombalia (9 km), est desservie par une route revêtue qui donne accès à l'autoroute A1 (Tunis à 35 km) et à la GP1 (Tunis-Cap Bon). Les formations exploitées appartiennent au Crétacé Supérieur (Campaniens, niveau Abiod, -80 à -65 millions d'années). Elles se subdivisent en 3 faciès [1,2] :

- le niveau inférieur constitué de calcaires durs à patine jaunâtre, blancs et crayeux, en bancs massifs de 30 à 50 cm, avec des joints marneux de 1 à 2 cm. Le sommet de ce niveau devient légèrement grisâtre à la cassure. L'épaisseur totale est de 80 à 90 m ;
- le niveau moyen, formé d'une alternance de marnes et de calcaires grisâtre de 70 à 80 m d'épaisseur ;
- le niveau supérieur, qui comprend des calcaires durs, massifs, à cassure conchoïdale, sublithographiques, en bancs de 70 à 80 cm. L'épaisseur moyenne est de 120 à 130 m.

Les calcaires blancs de cette formation se caractérisent par leur pureté chimique, leur cassure conchoïdale et leur dureté. Ils se prêtent bien à la taille, au concassage et au broyage. Ces calcaires se présentent généralement en bancs épais, stratifiés. Toutefois, la présence des petits joints marneux restreint leur emploi en tant que matériaux de qualité pour les bétons hydrauliques.

Trois carrières sont actuellement en exploitation sur le site de Aïn Tebournouk : la carrière Bou Attour (ouverte en 1991), la carrière SOMATP (ouverte en 1996) et la carrière ETEP (ouverte en 1997). C'est cette dernière qui a fourni le sable concassé 0/4, le gravillon 2/6,3 et le gravillon 6,3/16 utilisés dans le cadre du présent travail. Ces coupures sont produites à l'aide de deux concasseurs à percussion. Après abattage, le tout venant est passé dans le premier concasseur pour donner, après criblage, le sable primaire. Le refus est ensuite passé dans le second concasseur pour donner des gravillons et un sable secondaire.

II.2.2.2. Nahli

Située à proximité de Tunis (à 15 km au Nord, gouvernorat de l'Ariana), la carrière de Nahli est un site « stratégique » important. Les formations crétacées supérieures de Nahli (Campaniens, niveau Abiod, -80 à -65 millions d'années) se subdivisent en 3 faciès [1,2] :

- le niveau inférieur constitué d'une alternance de marnes et de calcaires. L'épaisseur totale de ce niveau est de 70 m environ ;

- le niveau moyen, qui présente aussi une alternance de marnes et de calcaires, mais de tendance marneuse plus développée. L'épaisseur moyenne est de 30 m environ ;
- le niveau supérieur, formé de calcaires crayeux blancs d'épaisseur variant entre 50 à 100 m, qui se terminent par les argiles de la formation Haria.

Une dizaine de carrières exploitent actuellement le site de Nahli. Celle retenue pour le présent travail est la carrière de El Hazami. Elle a fourni les coupures granulométriques suivantes (Fig. II-2) : un sable concassé 0/3,15, un gravillon 10/20 et un gravillon 12,5/25. Ces fractions sont produites selon le même procédé de fabrication décrit précédemment.

Fig. II-2 : Coupures granulométriques retenues pour la carrière Nahli.

Sable concassé 0/3,15 Gravillon 10/20 Gravillon 12,5/25



II.2.2.3. El Haoureb

Localisée à 35 km de Kairouan et à 100 km de Sousse/Monastir, la carrière de El Haoureb est l'une des plus importantes de la Tunisie centrale. C'est l'affleurement le plus septentrional des chaînons jurassiques de la chaîne Nara-Bou Dzer, communément connu sous le nom de « l'axe Nord-Sud de la Tunisie Centrale ». Il est constitué de calcaires dolomitiques en bancs bien individualisés, dont la puissance totale peut atteindre 210 m. Le gisement comprend à la base 60 m de calcaires cristallins gris-bleu en bancs de 20 à 80 cm, puis 150 m de calcaires gris-rosé, bien lités et parfois siliceux [1,2]. Il est caractérisé par un accès facile à la GP3, par de faibles pendages et par une découverte ténue. Quatre carrières sont installées sur le site. Les coupures granulométriques fournies par l'une d'entre-elles sont un sable concassé 0/4, un gravillon 5/12,5 et un gravillon 12,5/20. Le procédé d'élaboration de ces coupures est identique à celui décrit précédemment.

II.2.2.4. Jbel Ressas

A 30 km à l’Est de Tunis, le Jbel Ressas se distingue par la morphologie escarpée de ses calcaires massifs (Lias) qui jaillissent de la plaine Mornag pour culminer 800 m au dessus. Une falaise difficilement accessible marque ses flancs Nord et Ouest. Ce massif fait 3,5 km de long sur 1 km de large. Il est composé par différents niveaux jurassiques (-190 à -140 millions d’années) qui se subdivisent en 3 unités géologiques [1,2]. De bas en haut :

- 100 m de dolomies calcaires gris clair et foncés en gros bancs de 0,5 à 1 m (Sinémurien)
- 250 m de calcaires gris clair à gris foncé en gros bancs de 0,5 à 1 m ou massif (Pliensbachien) ;
- 450 m de calcaire gris clair à gris foncé massif ou en gros bancs pseudo récifaux ou cryptocristallins avec, au sommet, 15 m de calcaire gris foncé à rognons de silex (tithonique).

Les forts pendages de ce site constituent la difficulté majeure de son exploitation, dont les granulats produits sont d’excellente qualité. Une seule carrière, celle de la société « Les Grandes Carrières du Nord », est implantée sur le flanc Sud-Est où elle occupe pratiquement toutes les parties accessibles du massif. Son ouverture date de 1989. L’exploitation de la roche s’effectue par un dynamitage des bancs, suivi d’un chargement à la pelle mécanique. Le tout venant est transporté par des camions jusqu’aux installations de concassage (percussion), où il subit deux passages successifs destinés à produire les coupures granulométriques répondant aux besoins du marché. La Fig. II-3 présente une vue de la carrière et de l’un des ses fronts de taille. Pour cette étude, les coupures retenues (Fig. II-4) sont un sable concassé 0/4, un gravillon 5/12,5 et un gravillon 12,5/20.



Fig. II-3 : Vue d’ensemble de la carrière de Jbel Ressas et du front de taille.



Fig. II-4 : Coupures granulométriques des granulats retenues de la carrière Jbel Ressas.

Sable concassé 0/4 | Gravillon 5/12,5 | Gravillon 12,5/20



II.2.2.5. Jradou

Le site de la carrière de Jradou se trouve au lieu dit « Jbel El Rhezala », à environ 2,5 km au Nord du village de Jradou. On y accède par la route MC 35 reliant Tunis à Zaghouan (P.K. 26). Les unités stratigraphiques affleurantes dans cette région sont d'âges crétacé, tertiaire et quaternaire. Le gisement calcaire, objet de l'exploitation, est daté de l'Yprésien (Éocène inférieur, -56 à -52 millions d'années, formation Metlaoui). La direction des couches est Sud-Nord et les pendages sont de 40° vers l'Est [3]. Les calcaires sont gris foncé à patine claire, bien lités, en bancs épais de 0,20 à 1 m (Fig. II-5). Les couches varient entre 50 m et 100 m d'épaisseur. De rares intercalations marneuses existent. Les coupures granulométriques fournies par la carrière sont un sable concassé 0/3,15, un gravillon 3,15/12,5 et un gravillon 12,5/20 (Fig. II-6). Ces coupures sont produites selon les mêmes procédés que précédemment.

Fig. II-5 : Vue d'ensemble de la carrière Jradou et des fronts de taille.



Fig. II-6 : Coupures granulométriques des granulats retenues de la carrière Jradou.

Sable concassé 0/3,15 | Gravillon 3,15/12,5 | Gravillon 12,5/25



II.2.2.6. Tahent

A 45 km de Bizerte, le gisement de Tahent constitue un prolongement des chaines montagneuses de Jbel Lansarine s'étendant jusqu'à Béjà. La formation est d'âge Campaniens (Éocène inférieur, formation Metloui) et elle se subdivise en 3 faciès [1,2] :

- niveau inférieur : calcaires phosphatés (2 à 3 m) avec argiles et marnes sous-jacentes ;
- niveau moyen : alternance de calcaires et de marnes (2 à 5 m) ;
- niveau supérieur : calcaires durs, massifs (40 m environ) avec présence remarquable de nummulites (micro fossiles).

Les calcaires de cette formation sont en gros bancs, à débris coquilliers avec des intercalations de marnes et de gypse massif. Seule la carrière « El Gharbi Frères » est en exploitation. Son ouverture date de 2001. Elle ne fabrique qu'un granulat 5/12,5 qui a servi, dans le cadre du présent travail, à la fabrication des mélanges mixtes.

II.2.2.7. El Khlédia

Le gîte de El Khlédia (gouvernorat de Ben Arous) se trouve à 25 km au Sud de Tunis. Il s'agit d'un grès hétérogène de couleur jaune, ayant une teneur en silice variant entre 90 à 98,5 %, avec des oxydes de fer (0,5 à 0,8 %). La formation, d'âge oligocène, est représentée par une épaisse couche gréseuse, dite « grés Fortuna », qui comprend une partie inférieure argilo-gréseuse (« Fortuna A »), et une partie supérieure massive sableuse (« Fortuna B ») [1,2]. La cohésion de cette formation exige l'emploi d'explosif pour l'abattage. Le gisement fait l'objet d'une exploitation intensive. 45 carrières sont installées sur les deux sites de Henchir Khouenjel et de Henchir Kharrouba. Certaines carrières sont déjà sous le niveau phréatique. Le sable siliceux roulé fin (Fig. II-7) issu de ce grés n'a servi qu'à l'élaboration des mélanges mixtes.



Fig. II-7 : Sable siliceux roulé d'El Khlédia.



II.2.3. Ciment de Le Karrouba

Les ciments utilisés dans les bétons hydrauliques réalisés dans la région du district de Tunis sont ceux produits par la cimenterie de Le Karrouba, sise à Jbel Jeloud à 4 km de Tunis. Pour les bétons courants et économiques, le ciment privilégié est un Portland CEM II/A-L 32,5 [4]. Il a été retenu pour l'étude. Ce ciment est de couleur gris clair et il est dépourvu d'additions minérales autres que calcaires. Les quantités nécessaires pour l'étude ont été approvisionnées en une seule fois (conservation dans des sacs plastiques).

II.2.4. Conclusion

Les gisements retenus se différencient par leur origine géologique, leur mode d'affleurement, leur nature (majoritairement calcaire) et leur couleur. Les granulats provenant de ces gisements, hormis ceux de El Khlédia et de Tahent, sont issus d'un concassage primaire et secondaire. Le premier concassage est effectué par un concasseur à percussion. Il donne un sable et un refus pouvant avoir des éléments pouvant atteindre 80 mm de grosseur. Le concassage secondaire, à percussion lui aussi, réduit ces blocs pour donner les coupures commerciales. A Nahli et en raison de la faible induration de la roche dans certains fronts, le recours à l'utilisation d'un seul concasseur est parfois satisfaisant. Les prélèvements des granulats nécessaires à la fabrication des mélanges hydrauliques ont été effectués en une seule fois.

En raison de l'hétérogénéité de la roche dans un même gisement, les valeurs des propriétés des granulats trouvées dans les rapports techniques et dans la littérature, pour les différentes carrières, montrent des plages très ouvertes. C'est la raison pour laquelle il a été choisi de mener une identification spécifique pour les granulats de l'étude. Les essais de caractérisation usuels ont alors été pratiqués selon les normes tunisiennes INNORPI ou, à défaut, selon les normes AFNOR. Ces essais, bien connus des praticiens pour la plupart, sont décrit sommairement dans ce paragraphe, par soucis d'information du lecteur. Les résultats complètent les données relatives à ces matériaux granulaires. Des mesures complémentaires de compacité ont été réalisées sur les différentes fractions. Enfin, en l'absence de valeurs disponibles, la résistance à la compression des roches mères a été estimée à partir des graphiques de Tourenq et Arquié [5] qui relient cette propriété à la résistance aux chocs, los Angeles (LA).

II.3. Propriétés des matériaux retenus pour l'étude

II.3.1. Granulats

II.3.1.1. Granularité

La granularité des matériaux a été déterminée par deux méthodes différentes, selon la taille des grains. Pour les fractions supérieures à 80 µm, la granularité a été mesurée par tamisage par voie humide. La granularité de la partie fine (tailles inférieures à 80 µm) a été obtenue par sédimentométrie.

a) Fraction supérieure à 80 µm

La granularité des fractions supérieures à 80 µm a été mesurée selon la norme NF EN 933-1 [6]. Après séchage de l'échantillon à l'étuve et pesée de sa masse sèche, le tamisage a été réalisé avec des tamis à mailles carrées par voie humide, puis à sec après séchage des fractions. Après pesée des refus de chaque tamis, les courbes granulométriques ont pu être tracées. Les Tab. II-I et II-II donnent respectivement les résultats des gravillons et des sables des différentes carrières (G_1 pour les gravillons intermédiaires et G_2 pour les gravillons grossiers). Les courbes granulométriques des gravillons sont tracées sur la Fig. II-8. Celles des sables sont présentées sur la Fig. II-9.

Tab. II-I : Analyse granulométrique des gravillons (passants cumulés en %).

Ouverture des tamis (mm)	Aïn Tebournouk		Nahli		El Haoureb		Jbel Ressas		Jradou		Tahent
	2/6,3	6,3/16	10/20	12,5/25	5/12,5	12,5/20	5/12,5	12,5/20	3,15/12,5	12,5/20	5/12,5
	G_1	G_2	G_1	G_2	G_1	G_2	G_1	G_2	G_1	G_2	G_1
0,08	3,4	1,4	5,8	2	1,2	0,7	1,5	0,8	1,3	0,7	4,6
2	9,3										
2,5	13,7								2,8		
3,15	21,3						2,1		7,3		
4	39,3						3		18,9		6
5	57	2,6			5,8		6		34,5		9,7
6,3	88,3	10,8			28,8		18,4		51,2		20,6
8	98,2	32,8			60,7		52		67,2		44,5
10	100	54	9,8		87,3	3	81,5		80,8		70,6
12,5		81,7	39	5	98	27,4	96,6	3,5	91,1	2,4	89,8
16		96	79,7	25,7	100	86,3	100	41	100	64	100
20		100	98,7	57,7		98		94		100	
25			100	90,7		100		100			
31,5				100							

Tab. II-II : Analyse granulométrique du sable de concassage (passants cumulés en %)

Ouverture des tamis (mm)	Aïn Tebournouk	Nahli	El Haoureb	Jbel Ressas	Jradou	El Khlédia
	0/4	0/3,15	0/4	0/4	0/3,15	0/1
0,08	17,81	26,98	13,2	11	9,16	12
0,1	19	28,2	16	11,6	10	16,3
0,125	20,26	29,2	17,2	12,2	11	21,5
0,16	21,72	30,94	19,3	13	12	29
0,2	23,48	32,6	21	14	13,5	37,1
0,25	25,5	34,3	23	15,2	15	49,5
0,315	27,63	36,94	25,6	16,82	17	60,8
0,4	30,59	40	28,2	19	21	71,5
0,5	32,92	43,5	31,8	22	25	82,3
0,63	36,8	47,49	35,4	25,64	28,9	88,6
0,8	41,5	52	40,3	30	35	92
1	46	56,8	45,2	35	42	95,2
1,25	51,02	62,12	51	40,46	48	97
1,6	56,62	69,1	59,2	49	59	97,8
2	64,53	77,1	68,4	57,5	68	98,5
2,5	70,76	84,04	77,7	66,37	82	98,8
3,15	78,47	90	86,8	76	94	99,1
4	87,04	96	93,6	87	98	99,5
5	93,96	99,98	97,1	96,37	100	99,6
6,3	100	100	99	100		99,8
8			100			100

Fig. II-8 : Granularité des gravillons concassés (G_1 et G_2).

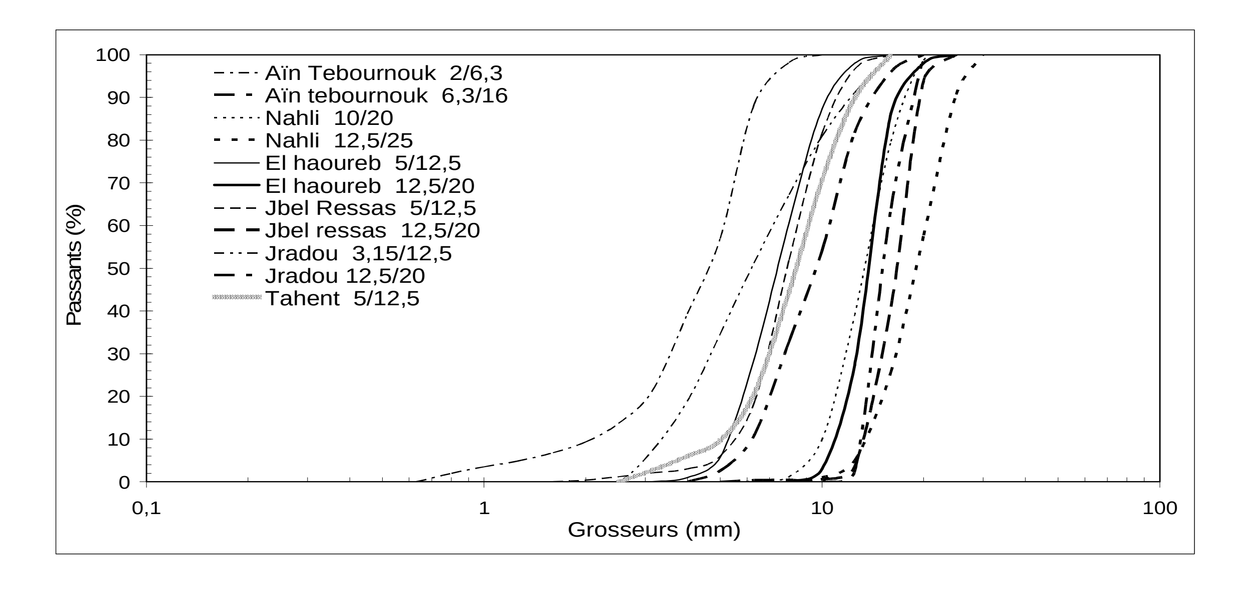
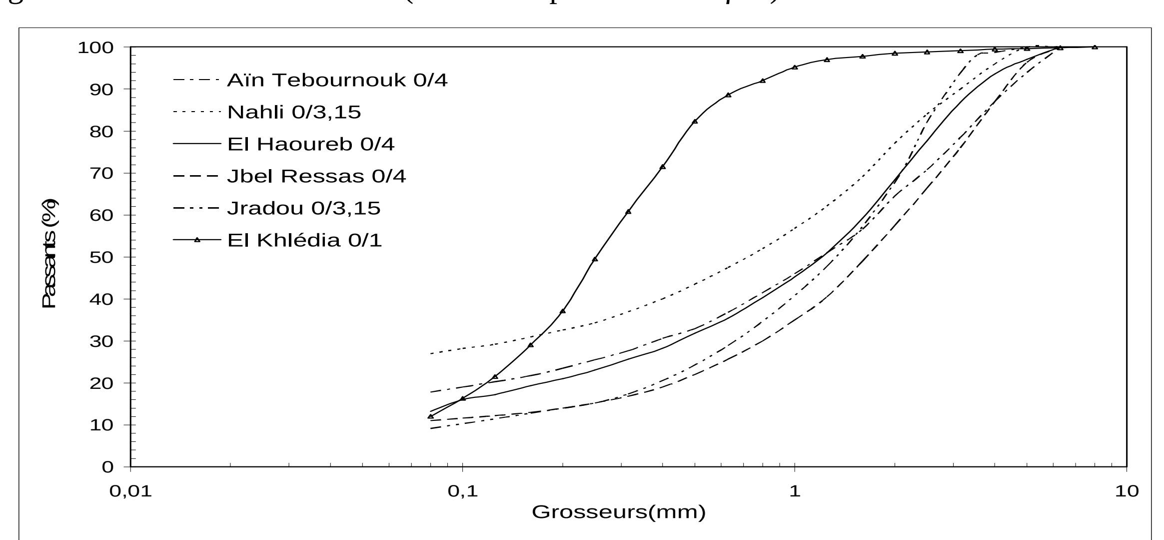


Fig. II-9 : Granularité des sables (fraction supérieure à 80 µm).



On remarque, d'après la Fig. II-8, que les granularités des gravillons G_2 sont assez similaires et plutôt resserrées, contrairement à celle des gravillons G_1 qui présentent certaines différences entre elles : les gravillons G_1 de Jradou et de Aïn Tebournouk sont plus fins : ceux de Nahli et de Tahent se distinguent par un taux de fines assez élevé (5,8 % pour le 10/20 de Nahli et 4,6 % pour le 5/12,5 de Tahent, Tab. II-I). Au regard de la norme NT 21.25 [7] qui s'applique en Tunisie et qui préconise une teneur maximale en fillers de 2 % pour les gravillons à béton, ces deux matériaux sont plutôt hors spécification. On notera aussi les granularités peu étalées des fractions G_1 de Jradou et de Aïn Tebournouk. Cette dernière présente plus de 13 % d'éléments de grosseur inférieure à 2,5 mm et moins de 43 % d'éléments de grosseur supérieure à 5 mm. La granularité du 2/6,3 de Aïn Tebournouk, assez fine, se rapproche de celle d'un sable.

Concernant les granularités des sables S (Fig. II-9), on constate qu'elles sont étalées et régulières, à l'exception de celle du grés de El Khlédia qui est plus fin et mieux gradué. Ces sables sont formés en majorité de gros éléments (leur module de finesse MF, compris entre 2,9 et 3,4, sont sensiblement supérieures à la limite admise par la norme NT 21.30 [8] pour les sables à béton). On notera toutefois que le sable de Nahli est plus fin, ainsi que le sable roulé de El Khlédia qui a un module de finesse assez faible (MF=1,26). Dans le béton, ce sable confère généralement une meilleure ouvrabilité. Les sables de Nahli et de Aïn Tebournouk sont riches en fines. Les teneurs, de 27 % et de 17,8 % respectivement (Tab II-II), dépassent les limites admises par la norme NT 21.30 [8], qui fixe une teneur maximale de 15 %. Le pourcentage des fines et les modules de finesse associés aux sables complètent le Tab. II-IV.

Des essais complémentaires sur les différents gravillons G_1 et G_2 se sont intéressés à la forme des grains. Il s'agit de la détermination du coefficient d'aplatissement selon la norme NT 21.19 [9]. Cet essai consiste à effectuer 2 tamisages successifs : le premier sur des tamis à mailles carrées, qui permet de classer l'échantillon en différentes classes granulaires d/D (avec D=1,25d) ; le second, pour les classes précédentes, sur des grilles à fentes parallèles d'écartement D/2. La valeur partielle A_i pour chaque classe élémentaire d/D est donnée par la relation (1). Celle pour l'ensemble du granulat A est donnée par la relation (2). Le Tab. II-III donne, à titre d'exemple, les résultats de cet essai (A_i et A) du gravillon G_1 (3,15/12,5) du Jradou.

$$A_i = 100 \frac{M_e}{M_g}, \text{ en \%} \quad (1)$$

où M_e est la masse du passant sur la grille à fentes parallèles et M_g celle du refus sur le tamis à mailles carrées.

$$A = 100 \frac{\sum M_e}{\sum M_g}, \text{ en \%} \quad (2)$$

Tab. II-III : Coefficients d'aplatissement A_i et A du gravillon G_1 (3,15/12,5) de Jradou

Tamisage sur des tamis à mailles carrées			Tamisage sur des grilles à fentes parallèles		
Ouverture (mm)	Classes granulaires d/D	Refus M_g (g)	Écartement des grilles (mm)	Passant M_e (g)	A_i (%)
12,5	12,5/16	128,6	8	22,5	16,86
10	10/12,5	154,16	6,3	17,45	11,32
8	8/10	204,26	5	27,72	13,57
6,3	6,3/8	240,9	4	33,12	13,75
5	5/6,3	250,32	3,5	48,15	19,24
4	4/5	234,45	2,5	42,36	18,07
$\sum M_g$		1217,51	$\sum M_e$	191,3	
A = ($\sum M_e$ / $\sum M_g$)*100					15,71

Les valeurs du coefficient d'aplatissement A pour les gravillons G_1 et G_2 de toutes les carrières complètent le Tab. II-IV. Elles sont comprises entre 10 et 16 % (les valeurs partielles montrent souvent des amplitudes plus grandes). Cette régularité s'explique par des modes d'élaboration comparables entre carrières et par des propriétés physico-mécaniques assez semblables entre les différents matériaux calcaires. Les valeurs d'aplatissement indiquent que ces gravillons ont une forme plutôt trapue, favorable à la mise en œuvre dans les bétons hydrauliques (bonne maniabilité, bonne compacité).

Tab. II-IV : Pourcentage en fines des granulats, module de finesse des sables et coefficient d'aplatissement des gravillons.

Origine	Coupure		<80µm (%)	MF	A %
Aïn Tebournouk	S	0/4	17,8	2,98	
	G_1	2/6,3	3,4		
	G_2	6,3/16	1,4		12
Nahli	S	0/3,15	27,0	2,38	
	G_1	10/20	5,8		14,9
	G_2	12,5/25	2,0		13,6
El Haoureb	S	0/4	13,2	2,94	
	G_1	5/12,5	1,2		15,3
	G_2	12,5/20	0,7		10,3
Jbel Ressas	S	0/4	11	3,41	
	G_1	5/12,5	1,5		14,2
	G_2	12,5/20	0,8		10,6
Jradou	S	0/3,15	9,2	3,43	
	G_1	3,15/12,5	1.3		15,7
	G_2	12,5/20	0.7		11,7
Tahent	G_1	5/12,5	4,6		13
El Khlédia	S	0/1	12	1,26	

b) Fraction inférieure à 80 µm

La granularité de la fraction inférieure à 80 µm a été obtenue par sédimentométrie [10]. Cette technique permet de compléter l'analyse granulométrique par tamisage jusqu'aux 1 µm. Son principe repose sur la loi de Stockes qui exprime, à partir de l'équilibre, la relation entre la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans un liquide et le diamètre de cette particule. Cette loi s'écrit :

$$v = (\rho_S - \rho_W)\ g\ \frac{D_t^2}{1{,}8\eta}, \text{ en cm/s} \qquad (3)$$

où v est la vitesse de décantation de la particule (cm/s), g est l'accélération de la pesanteur (cm/s^2), ρ_S est le poids spécifique de la particule (kN/m^3), ρ_W est le poids spécifique du liquide (kN/m^3), η est la viscosité du liquide de décantation (poises) et D_t est le diamètre de la particule (cm).

L'essai consiste à mesurer à l'aide d'un densimètre, pour différents temps donnés de décantation, la densité d'une suspension à une profondeur H_t. Au temps t=0, la suspension est considérée homogène. A t quelconque, la densité de la suspension varie avec la profondeur H_t. Les particules qui à étaient initialement en surface se trouvent à l'instant t à la profondeur H_t. Elles ont décanté avec une vitesse constante $v=H_t/t$. Leur diamètre équivalent D_t est alors donné par l'expression :

$$D_t = \left(\frac{1}{g} \frac{1{,}8\eta}{(\rho_s - \rho_w)} \frac{H_t}{t} \right)^{0{,}5} \text{, en cm} \quad (4)$$

Le pourcentage en masse des particules de diamètre inférieur à D_t est alors déduit de la relation :

$$P_t = \frac{V_s}{P} \frac{\rho_s \rho_w}{(\rho_s - \rho_w)} (R_c - 1) \quad (5)$$

où V_s est le volume de la suspension (cm^3), conventionnellement prise 2000 cm^3, P le poids de l'échantillon sec contenu dans la suspension, soit 8 Newton pour 80 g d'échantillon (masse généralement adoptée pour réaliser l'essai), R_c la densité de la suspension en tenant compte des corrections apportées à la lecture R du densimètre dues à la température C_T, au défloculant C_d et à l'effet du ménisque du densimètre C_m.

Après préparation de la suspension avec défloculant (5 % d'héxamétaphosphate de sodium), conformément à la norme NF P 94-057 [10], des mesures de densité ont été prises à 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 20 min, 40 min, 80 min, 4 h et 24 h [11]. Les Tab. II-V et II-VI donnent respectivement, à titre d'exemple, les résultats obtenus pour la fraction fine du sable de Nahli et du sable de Aïn Tebournouk. P' est le pourcentage, par rapport à la masse totale du sable à l'état brut, des particules de diamètre inférieur à D_t. L'exploitation de l'ensemble des résultats a permis de tracer les courbes granulométriques des fines des différents sables qui sont reportées sur la Fig. II-10.

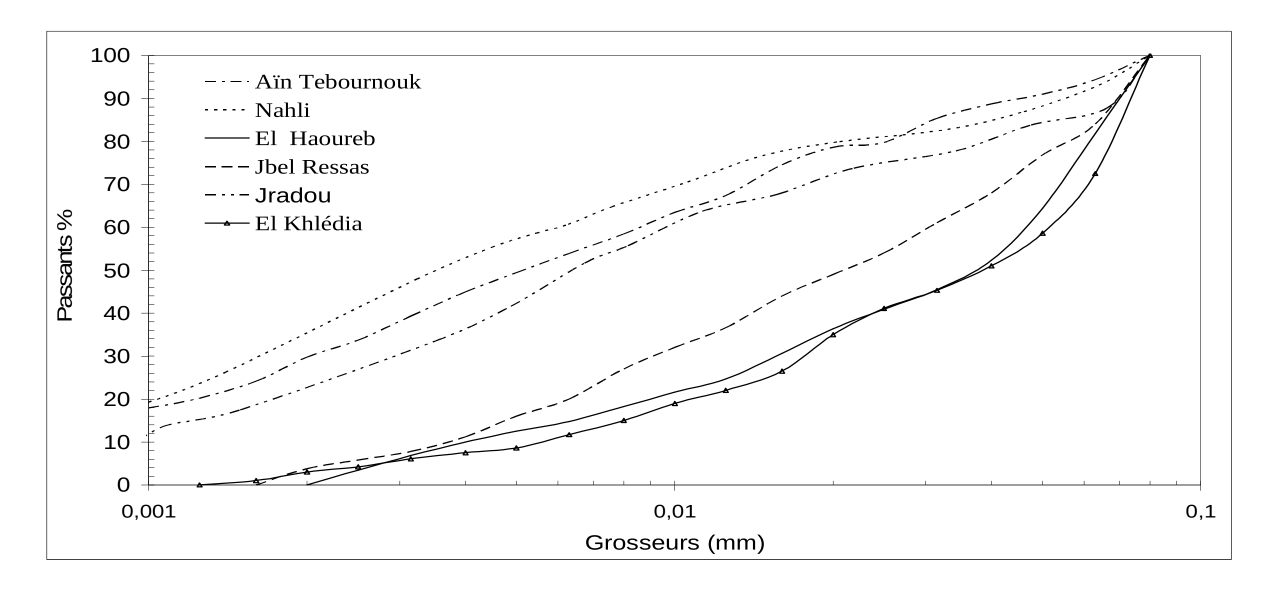
Tab. II-V : A titre d'exemple, résultats de l'essai de sédimentométrie réalisé sur la fraction fine du sable de Nahli avec un défloculant.

t (min)	R	T (°C)	C_T	C_m	C_d	R_C	η poise	H_t (cm)	D_t (µm)	P_t %	P' %
0,5	1,023	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0227	0,001521	11,41	64,06	93,06	25,11
1	1,0215	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0212	0,001521	11,84	46,14	86,91	23,45
2	1,0205	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0202	0,001521	12,12	33,02	82,81	22,34
5	1,0198	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0195	0,001521	11,79	20,59	79,94	21,57
10	1,019	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0187	0,001521	12,02	14,70	76,66	20,68
20	1,0175	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0172	0,001521	12,45	10,58	70,51	19,02
40	1,0161	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0158	0,001521	12,85	7,60	64,77	17,48
60	1,0151	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0148	0,001521	13,13	6,27	60,67	16,37
80	1,0146	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0143	0,001521	13,28	5,46	58,62	15,82
120	1,0138	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0135	0,001521	13,50	4,50	55,34	14,93
240	1,012	21,7	0,0008	0,0004	-0,0015	1,0117	0,001521	14,02	3,24	47,96	12,94
1440	1,0075	19,6	0	0,0004	-0,0015	1,0064	0,001556	15,31	1,40	26,24	7,08

Tab. II-VI : A titre d'exemple, résultats de l'essai de sédimentométrie réalisé sur la fraction fine du sable de Aïn Tebournouk avec un défloculant.

t (min)	R	T (°C)	C_T	C_m	C_d	R_C	η poise	H_t (cm)	D_t (µm)	P %	P' %
0,5	1,0223	19	-0,0003	0,0004	-0,0015	1,0209	0,00156549	11,61	63,92	84,03	14,97
1	1,0215	19	-0,0003	0,0004	-0,0015	1,0201	0,00156549	11,84	45,64	80,82	14,39
2	1,0205	19	-0,0003	0,0004	-0,0015	1,0191	0,00156549	12,12	32,66	76,80	13,68
5	1,02	19	-0,0003	0,0004	-0,0015	1,0186	0,00156549	11,84	20,41	74,79	13,32
10	1,0198	19	-0,0003	0,0004	-0,0015	1,0184	0,00156549	11,90	14,47	73,98	13,18
20	1,0175	19	-0,0003	0,0004	-0,0015	1,0161	0,00156549	12,55	10,51	64,73	11,53
40	1,0156	19	-0,0003	0,0004	-0,0015	1,0142	0,00156549	13,10	7,59	57,09	10,17
60	1,0147	19	-0,0003	0,0004	-0,0015	1,0133	0,00156549	13,35	6,26	53,48	9,52
80	1,0138	19,5	-0,00015	0,0004	-0,0015	1,01255	0,00155743	13,61	5,46	50,46	8,99
120	1,013	19,6	-0,00015	0,0004	-0,0015	1,01175	0,00155581	13,84	4,49	47,24	8,41
240	1,011	20,1	0	0,0004	-0,0015	1,0099	0,00154767	14,41	3,23	39,81	7,09
1440	1,0071	19,1	-0,0003	0,0004	-0,0015	1,0057	0,00156388	15,53	1,38	22,92	4,08

Fig. II-10 : Granularité des fines des sables (fraction inférieure à 80 µm).



La Fig. II-10 montre que les granularités des fines du sable de Nahli, de Aïn Tebournouk et de Jradou sont comparables. Leur distribution dimensionnelle est continue et ils contiennent plus de 10 % de particules inférieures à 1 µm. Plus de 50 % de particules sont de tailles inférieures à 7 µm. Les courbes granulométriques des fines du sable de El Khlédia et de El Haoureb présentent un léger creux, mentionnant une majorité de particules de tailles supérieures à 20 µm (plus de 70 %). Contrairement aux sables précédents, ces derniers ne contiennent pas de particules de tailles inférieures à 1 µm. La granularité des fines du sable de Jbel Ressas est intermédiaire, mais toutefois plus proche de celles des sables de El Khlédia et de El Haoureb. Ces fines ne contiennent pas de particules inférieures à 1 µm.

Les surfaces spécifiques Blaine des fillers calcaires issus des sables n'étant ni connues, ni mesurées, elles ont alors été estimées à partir des courbes granulométriques, par comparaison avec des courbes granulométriques de fillers calcaires de surfaces spécifiques connues [12]. Celle des fillers siliceux associés au sable de El Khlédia a été fournie par le fabricant. Les valeurs correspondantes sont données dans le Tab. II-VII. Notons enfin que la masse volumique réelle des fillers a été prise égale à celle du sable dont ils sont issus, en première approximation. Les données correspondantes complètent le Tab. II-VII.

Tab. II-VII : Surface spécifique et de masses volumiques réelles des fillers des sables.

Origine	Surface Spécifique (m^2/kg)	Masse volumique réelle (t/m^3)
Aïn Tebournouk	550	2,63
Nahli	500	2,55
El Haoureb	250	2,76
Jbel Ressas	310	2,67
Jradou	450	2,638
El Khlédia	250	2,58

II.3.1.2. Propriétés physiques

a) Masses Volumiques

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Pour les matériaux granulaires de l'étude, les masses volumiques en vrac, absolues et réelles ont été mesurées conformément aux normes tunisiennes en vigueur :

- la masse volumique en vrac est la masse de l'unité de volume apparent du granulat, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière et tous les vides présents. Le volume du granulat est celui du conteneur dans lequel il est placé. La mise en place de l'échantillon de granulat peut s'effectuer soit par écoulement au cône suivi ou non d'une vibration, voire du compactage. Le résultat dépend du mode de remplissage. Dans le cadre de cette étude, le volume est mesuré par écoulement sans compactage. Le granulat est versé dans un récipient normalisé, de volume 1 l par exemple dans le cas d'un sable, jusqu'à ce qu'il déborde en formant un dôme puis il est arasé à la règle (le volume du granulat est donc 1 l). La masse volumique en vrac a été mesurée, pour l'ensemble des fractions granulaires, conformément à la norme NT 21.127 [13]. Son expression MVvrac est donnée par la relation suivante :

$$MVvrac = \frac{M}{V} \text{ , en } (kg/m^3, g/cm^3) \quad (6)$$

où M est la masse apparente de l'échantillon (g) et V est le volume de l'échantillon (cm^3) ;

- la masse volumique absolue est la masse de l'unité de volume absolu du granulat, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière sans tenir compte du volume de toute forme de vides. Les essais ont étés réalisées selon la norme NT 21.94 [14]. Son expression MVAb est donnée par la relation suivante :

$$MVAb = \rho_{eau} \frac{M_s}{(M_s + M_2 - M_1)} \text{ , en (kg/m}^3\text{, g/cm}^3\text{)} \quad (7)$$

où ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau en kg/m^3, M_s est la masse sèche de l'échantillon (g), M_1 est la masse du pycnomètre rempli d'eau et contenant l'échantillon (g) et M_2 est la masse du pycnomètre rempli d'eau en g ;

- la masse volumique réelle est la masse de l'unité de volume réel du granulat, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière sans tenir compte du volume des vides intergranulaires. Les essais ont été réalisés selon les normes dévolues aux gravillons NT 21.04 [15] et aux sables NT 21.05 [16]. MVR est donnée par la relation suivante :

$$MVR = \frac{M_s}{(M_a - M_a')} \text{ , en (kg/m}^3\text{, g/cm}^3\text{)} \quad (8)$$

où M_s est la masse sèche de l'échantillon (g), M_a est la masse saturée de l'échantillon dans l'air (g) et M_a' est la masse de l'échantillon en pesée hydrostatique (g).

L'ensemble des résultats pour les différentes fractions granulaires est reporté dans le Tab. II-VIII. Chaque valeur présentée est la moyenne de trois mesures.

b) Absorption, teneur en eau et porosité

Les essais de détermination du coefficient d'absorption d'eau et de la teneur en eau sur des échantillons représentatifs des différentes fractions granulaires ont étés réalisés selon les normes [15] et [16]. L'expression du coefficient d'absorption d'eau Ab, qui définit le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon M_a, provoquée au bout de 24 heures par une imbibition partielle en eau, à la masse de matériau sec M_s, est donnée par la relation suivante :

$$Ab = 100 \frac{(M_a - M_s)}{M_s} \text{ , en \%} \quad (9)$$

L'expression de la teneur en eau W, qui définit le rapport de la différence entre la masse de l'échantillon à sa teneur en eau en l'état M et sa masse sèche M_s, à la masse sèche de l'échantillon, est donnée par la relation suivante :

$$W = 100 \frac{(M - M_s)}{M_s} \text{ , en \%} \quad (10)$$

L'essai de détermination de la porosité a été réalisé selon la norme [15]. L'expression de la porosité n, qui définit le rapport du volume des vides accessibles à l'eau au volume réel de l'échantillon est donnée par la relation suivante :

$$n = 100 \frac{(M_W - M_s)}{(M_W - M_w')} \text{ en } \% \qquad (11)$$

où M_s est la masse de l'échantillon sec, M_W est la masse dans l'air de l'échantillon saturé en eau et M_w' est la masse dans l'eau de l'échantillon saturé en eau.

Les valeurs obtenues pour les différentes fractions granulaires, objet chacune de 3 mesures, complètent le Tab. II-VIII. Notons que la mise en œuvre de certains essais liés à la fraction sable, surtout ceux riches en fines, tels que les sables de Nahli et de Aïn Tebournouk, a posé parfois certains difficultés d'appréciation, notamment au moment du séchage progressif de l'échantillon jusqu'à son état imbibé surface sèche. Les teneurs en eau des granulats ont été mesurées le même jour ; la température du prélèvement des échantillons était de 25 °C.

Tab. II-VIII : Propriétés physiques des granulats ; Masses volumiques, absorption d'eau, teneur en eau et porosité.

Origine	Coupure		MVvrac t/m^3	MVAb t/m^3	MVR t/m^3	Ab %	W* %	n %
Aïn Tebournouk	S	0/4	1,57	2,66	2,63	2	2,94	1,13
	G_1	2/6,3	1,37		2,63	2,6	2,16	1,21
	G_2	6,3/16	1,32		2,62	3,2	1,46	2,11
Nahli	S	0/3,15	1,41	2,62	2,55	6,8	6,8	1,27
	G_1	10/20	1,25		2,531	7,3	1,38	5,06
	G_2	12,5/25	1,268		2,562	7,7	1,16	7,38
El Haoureb	S	0/4	1,53	2,79	2,76	0,9	0,91	1,06
	G_1	5/12,5	1,415		2,746	1	0,55	1,49
	G_2	12,5/20	1,387		2,78	1	0,51	1,96
Jbel Ressas	S	0/4	1,665	2,69	2,67	0,3	1,03	1,11
	G_1	5/12,5	1,38		2,66	0,3	0,58	1,51
	G_2	12,5/20	1,37		2,68	0,4	0,52	2,06
Jradou	S	0/3,15	1,349	2,68	2,638	0,6	0,88	1,79
	G_1	3,15/12,5	1,212		2,39	2,6	0,56	2,00
	G_2	12,5/20	1,296		2,48	2	0,49	2,48
Tahent	G_1	5/12,5	1,253	2,61	2,404	9,8	1,66	4,88
El Khlédia	S	0/1	1,630	2,59	2,58	1,7	1,68	0,7

* : mesure prise le même jour pour l'ensemble des granulats

En considérant l'ensemble des propriétés physiques, on constate que :

- les masses volumiques absolues, excepté celles de El Haoureb et de El Khlédia, varient peu d'un site à l'autre du fait de la similitude de la composition chimique des matériaux. La masse volumique absolue assez élevée de El Haoureb s'explique par la présence de dolomie. Celle de El Khlédia, plus faible, est traduite par la présence de silice (quartz) ;

- les masses volumiques réelles des gravillons de Tahent, de Nahli et de Jradou sont assez faibles. Ces gravillons sont caractérisés par une forte porosité (et absorption) ;
- les absorptions des granulats de Nahli et de Tahent, supérieures à 7 %, sont nettement plus élevées que celles des autres granulats (fortes porosités). Les valeurs mesurées dépassent celles spécifiées par la norme NT 21.30 [8], qui préconise une absorption d'eau maximale de 5 % pour les granulats à bétons. Si les grains ne sont pas saturés au moment de la fabrication, le maintien de la maniabilité du béton frais risque alors d'être compromis. Le fluage et à la durabilité des bétons risque aussi d'être modifiées [17]. Notons que les quantités d'eau absorbées par les granulats ont été prises en compte dans les formules de béton, de manière à maîtriser l'eau efficace ;
- l'absorption des sables, excepté pour Nahli, n'a pas d'effet sensible sur la masse volumique réelle, à cause d'une porosité interne assez faible. Elle est négligeable pour le sable siliceux fin de El Khlédia, qui a une porosité très faible. Par contre, elle pénalise la MVR des gravillons de Jradou, de Tahent, de Nahli et de El Haoureb ;
- les masses volumiques apparentes des sables sont supérieures à celles des gravillons, ce qui suppose une meilleure compacité.

c) Propreté des sables

Deux essais complémentaires se sont intéressés à la propreté des sables. Il s'agit tout d'abord de l'essai d'équivalent de sable ES. Cet essai, réalisé selon la norme NT 21.26 [18] sur la fraction 0/2 des sables, permet d'apprécier uniquement la propreté globale du matériau, sans distinguer la nature des fines en présence. Il parait donc indispensable, pour évaluer de façon plus sélective la propreté des sables, de compléter l'essai d'équivalent de sable par l'essai au bleu de méthylène (méthode à la tâche), dont le principe est de déterminer la capacité d'adsorption des fines actives par fixation du bleu de méthylène, et de mettre ainsi en évidence l'activité des surfaces des fines. Cet essai a été effectué sur la fraction fine des sables selon la norme NF P 18-592 [19]. Il doit être pratiqué si la valeur de ES est inférieure à la valeur spécifiée par la norme NT 21.30 [8].

Des essais de limites d'Atterberg et d'indice de plasticité ont aussi été réalisés. Ces essais, effectués selon la norme NF P 94-051 [20] sur la fraction fine inférieure à 400 µm des sables (et des gravillons), traduit l'évolution de la consistance d'un matériau fin avec la teneur en eau. Quand celle-ci augmente, les argiles passent d'une consistance solide à une consistance plastique, puis liquide. Elle permet ainsi de définir l'étendue du domaine

plastique du sable. D’après [21], les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité pourraient refléter la composition minéralogique et chimique du matériau, lorsque la part de l’eau liée aux argiles devient supérieure à la quantité d’eau libre. Un sable dépourvu de fines argileuses risque d’entraîner un défaut de plasticité du béton. A l’inverse, une présence élevée d’argile risque d’entraîner des gonflements au sein du béton [22].

Les valeurs de ces propriétés physiques sont données par les relations ci-après. Les résultats obtenus sont reportés dans le Tab II-IX.

* Équivalent de sable : ES :

$$ES = 100\frac{H_2}{H_1} \quad (12)$$

où H_1 est la hauteur de la partie sableuse sédimentée et H_2 est la hauteur totale du floculat et de la partie sableuse sédimentée mesurée au piston.

* Valeur de bleu à la tâche: VBta

$$VBta = \frac{(V_1 - v')}{q} \text{ , en g/100g} \quad (13)$$

où V_1 est le volume final de solution injectée en ml, v' est le volume de solution de bleu pour la kaolinite et q est la masse réelle de fines soumises à l’essai.

* Indice de plasticité : IP

$$IP = LL - LP \text{ , en \%} \quad (14)$$

où LL est la limite de liquidité correspondante à la teneur en eau qui marque le passage de l’état plastique à l’état liquide en %, et LP est la limite de plasticité correspondante à la teneur en eau qui marque le passage de l’état solide avec retrait à l’état plastique en %.

Tab. II-IX : Propriétés physiques des granulats - Propreté.

Origine	Coupure		ES 0/2	IP <400µm (%)	VBta 0/2 (g/100g)
Aïn Tebournouk	S	0/4	38	8	3,27
Nahli	S	0/3,15	54	10	3,86
El Haoureb	S	0/4	66	Ind.*	1,83
Jbel Ressas	S	0/4	85	Ind.*	1,03
Jradou	S	0/3,15	62	7	5,91
El Khlédia	S	0/1	73	Ind.*	2

* : Ind = indéterminé

En considérant l’ensemble des propriétés physiques liées à la propreté des sables, on constate que :

- les valeurs de ES pour El Haoureb, Jbel Ressas, Jradou et El Khlédia dépassent sensiblement les valeurs des spécifications de la norme NT 21.30 [8] des sables à bétons

(ES > à 60 pour les sables concassés et ES > à 70 pour les sables roulés). Selon ce critère, les sables de El Haoureb et de Jradou ont une propreté admissible pour les bétons de qualité courante. Ceux de Jbel Ressas et de El Khlédia conviennent mieux pour les bétons de qualité supérieure ;

- les valeurs de ES pour Aïn Tebournouk et Nahli sont inférieures aux valeurs spécifiées par la norme NT 21.30 [8]. Le recours à l'essai de bleu est donc nécessaire avant de statuer pour ces sables [23] ;
- les valeurs de bleu des sables de Jradou, de Nahli et de Aïn Tebournouk dépassent la valeur supérieure spécifiée par la norme NT 21.30 [8], qui est de 1,0 g de bleu pour 100 g de fines (elle est de 1,5 selon les spécifications relatives aux granulats, traités aux liants hydrauliques, pour chaussées [24]). Une partie non négligeable des fines de ces sables est de nature argileuse. Elles peuvent entraîner pour les bétons des effets secondaires, dus en particulier à une augmentation du rapport eau/ciment pour maintenir la maniabilité ;
- L'indice de plasticité des fines de Nahli, de Aïn Tebournouk et de Jradou, qui ont des valeurs VBta assez élevées, est mesurable, alors que celui des fines de Jbel Ressas, de El Haoureb et de El Khlédia n'est pas déterminable (inférieur à 6 %).

d) Compacité

Depuis peu, certaines méthodes de composition des mélanges granulaires font appel à la mesure de la compacité des tranches élémentaires [25]. Cet essai, comparé aux essais de caractérisation normative des granulats, traduit mieux le lien pouvant exister entre les propriétés des mélanges et les diverses propriétés morphologiques des grains élémentaires, liées à l'histoire géologique de la roche et à son mode d'élaboration. Il constitue ainsi un moyen supplémentaire de décryptage des structures granulaires.

Pour les grains de taille supérieure à 80 µm, la technique consiste à relever la compacité Φ de l'empilement granulaire lorsque le granulat est soumis à une vibration sous contrainte de 10 kPa dans un cylindre métallique. A défaut d'autres essais, les interactions granulaires tributaires de l'état de surface des matériaux entrent en jeu, ce qui permet d'expliquer, par exemple, le comportement différent de deux matériaux de granularité identique [26]. Pour les poudres (ciment, fillers), la technique consiste à déduire la compacité d'un essai de pâte lisse dans un malaxeur en mouvement. Le protocole est caractérisé par un indice de serrage K=9 pour les grains et K=6,7 pour la pâte lisse [27]. Il a été appliqué à

l’ensemble des granulats de l’étude (granulats d/D lavés et dépourvus de fillers ; fractions fines extraites par tamisage). Connaissant la granularité de chaque matériau, la compacité Φ permet, à l’aide du Modèle d’Empilement Compressible implanté dans le logiciel René-LCPC [28], de calculer, dans un premier temps, les compacités réelles α_i de chaque tranche élémentaire constituant le matériau. Ces compacités, dites aussi compacités propres des classes granulaires, sont tributaires de la taille des grains d_i. Selon [27], elles peuvent être décrites par des fonctions $\alpha_i(d_i)$ qui peuvent prendre, selon le diamètre et le mode d’élaboration des grains, une des formes suivantes :

$$\alpha_i(d_i) = B \text{ si } d_i \succ 1\ \mu m \text{ ; valable pour les fines (<80µm)} \quad (15)$$

$$\alpha_i(d_i) = A\ d_i + B \text{ ; valable pour les granulats concassés} \quad (16)$$

$$\alpha_i(d_i) = A\ \frac{\sqrt{d_i}}{\sqrt{d_i} + B} \text{ ; valable pour les granulats roulés} \quad (17)$$

Les constantes A et B sont déterminées de façon à ce que la fonction $\alpha_i\ (d_i)$ soit croissante, pour traduire le fait souvent observé que pour la même nature des grains, les grains de petite taille se compactent moins bien que ceux de plus grande taille. En pratique, on se satisfait généralement d’une fonction constante sur chaque fraction du matériau. La relation $\alpha_i\ (d_i)$ s’écrit alors :

$$\alpha_i(d_i) = B \quad (18)$$

La compacité résiduelle β_i (compacité virtuelle obtenue si l’on arrangeait au mieux les grains un à un) d’une classe élémentaire est déduite de la compacité réelle par la relation implicite suivante [27] :

$$\beta_i = (1 + \frac{1}{K})\ \alpha_i \quad (19)$$

où K correspond à l’indice de serrage propre au protocole expérimental suivi.

d1) Compacité des matériaux grenus (fraction >80µm)

La technique proposée par [27] pour la mesure de la compacité Φ d’un matériau grenu consiste à placer dans un cylindre métallique de section S, un échantillon de la classe analysée de masse sèche M_s et à le soumettre à une vibration de 60 Hz pendant deux minutes, sous une pression de 10 kPa transmise perpendiculairement par un piston plat. L’indice de serrage correspondant est égal à 9. Le volume solide des grains est déduit de la hauteur h finale de

l'échantillon et de la masse volumique réelle MVR du matériau. La compacité Φ est alors calculée selon la relation suivante :

$$\Phi = \frac{M_s}{MVR.S.h} \qquad (20)$$

Une masse sèche M_s d'échantillon de 3 kg a été prise pour les fractions comprises entre 80 µm et 5 mm et une masse sèche de 7,5 kg pour les fractions supérieures à 5 mm.

Toutefois, il se produit aux limites du moule un effet de paroi, qui décompacte l'empilement des grains sur une distance estimé à d/2. Suite aux travaux de Ben Aïm [29], cet effet a été pris en compte dans le MEC par le biais d'un coefficient correcteur q, entre compacité non confinée $\underline{\Phi}$ et la compacité Φ mesurée (confinée), selon la relation :

$$\underline{\Phi} = q\,\Phi \quad \text{avec} \quad q = \frac{1}{1-(1-k_w)\left[1-(1-\frac{d}{\phi})^2\ (1-\frac{d}{h})\right]} \qquad (21)$$

où ϕ est le diamètre du cylindre (ϕ =160 mm pour 16×32) et k_w est un coefficient qui tient compte de la forme des grains. Il a été ajusté expérimentalement à 0,87 pour les grains roulés et 0,71 pour les grains concassés [30].

Un tel dispositif de mesure de compacité a été mis au point pour la première fois au Laboratoire de Génie Civil (LGC) à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT) pour réaliser nos essais. Il a nécessité un montage proche de celui du protocole d'essai. La fixation du cylindre sur la table vibrante a été assurée par des serre-joints (Fig. II-11). Le processus de vibration a été gardé constant pour toutes les classes granulaires. Chaque valeur expérimentale prise en compte dans le modèle est la moyenne de trois mesures successives faites sur le même échantillon. Le Tab. II-X donne les résultats des mesures (hauteur de l'échantillon après serrage) ainsi que les valeurs des compacités Φ mesurées expérimentalement, des compacités réelles α_i et des compacités virtuelles β_i (supposées uniformes) pour chaque coupure de chaque matériau.

Fig. II-11 : Dispositif de mesure de la compacité des matériaux grenus – ENIT 2003.





d2) Compacité des poudres (fraction <80µm)

La mesure de la compacité des poudres (fines) est comparable par certains aspects au cas précédent. Il s'agit de mesurer le volume solide Φ par une phase expérimentale qui doit être réalisée avec des fines compactées par une intensité connue. Comme il n'est pas facile de séparer les fines en tranches élémentaires, la mesure de la compacité se fait sur tout le produit (dont on connaît la granularité). Les fonctions compacités propres satisfont la relation (15). Par convention, la compaction de référence est obtenue lorsque le mélange constitué d'une masse p (au moins 350 g) de produit sec et d'une masse e d'eau, atteint par un malaxage dans un malaxeur normalisé l'état de « pâte lisse et épaisse » [27]. Cet état standard est caractérisé par un indice de serrage de 6,7 [28]. Lorsque la pâte se forme, on admet que les interstices entre les grains sont juste emplis d'eau et que les particules commencent à être suspendues dans la phase aqueuse continue. La teneur en eau e/p sert alors à calculer la compacité de la poudre selon la relation suivante :

$$\Phi = \frac{1}{1 + \rho_p \frac{e}{p}} \tag{22}$$

où ρ_p est la densité réelle de la poudre testée.

Selon [31], il est recommandé de mesurer la demande en eau des fillers calcaires en présence d'un dosage de 10 et 20 % de ciment. La compacité des fillers est alors déduite par extrapolation des mesures jusqu'à 0 % de ciment. Avec cette technique, les calculs de compacité réalisés avec le MEC sur les fillers sont satisfaisants. Les résultats des essais de demande en eau effectués sur les fillers issus des sables retenus pour l'étude, en l'occurrence la quantité d'eau e, ainsi que les valeurs des compacités Φ complètent le Tab. II-X.

Tab. II-X : Résultats de l'essai de compacité (e et h) et valeurs des compacités (Φ, α_i et β_i) des matériaux.

Origine	Fractions	e (l)	h (cm)	Φ	α_i	β_i
Aïn Tebournouk	fillers	79,86		0,625	0,4109	0,4722
	0,08/4		8,1	0,701	0,5271	0,5857
	2/6,3		22,075	0,643	0,5734	0,6371
	6,3/16		22,7	0,628	0,5928	0,6587
Nahli	fillers	71,04		0,659	0,4549	0,5228
	0,08/3,15		8,5	0,689	0,5264	0,5849
	10/20		25,345	0,582	0,5707	0,6341
	12,5/25		25,85	0,564	0,5570	0,6189
EL Haoureb	fillers	79,56		0,614	0,4598	0,5284
	0,08/4		8,3	0,652	0,4871	0,5412
	5/12,5		22,25	0,611	0,5824	0,6471
	12,5/20		23,4	0,574	0,5746	0,6384
Jbel Ressas	fillers	81,68		0,616	0,4489	0,5159
	0,08/4		8,31	0,673	0,5262	0,5847
	5/12,5		22,5	0,624	0,5926	0,6584
	12,5/20		23,5	0,593	0,5994	0,666
Jradou	fillers	82,36		0,617	0,4306	0,4949
	0,08/3,15		8,8	0,643	0,5063	0,5626
	3,15/12,5		22,7	0,688	0,6230	0,6922
	12,5/20		26,9	0,559	0,5711	0,6346
Tahent	5/12,5		24,55	0,632	0,5873	0,6526
El Khlédia	fillers	109,16		0,554	0,4124	0,474
	0,08/1		8,4	0,689	0,5827	0,6474

La lecture de ce tableau appelle aux remarques suivantes :

- les compacités résiduelles β_i des granulats tendent (logiquement) à augmenter avec la taille des grains. Elles se situent dans l'intervalle proposé par [30] ($0,58 < \beta_i < 0,74$ pour les granulats et $0,47 < \beta_i < 0,51$ pour les fillers calcaires) ;
- on constate que la compacité expérimentale Φ des sables S est supérieure à celle des gravillons intermédiaires G_1, qui elle-même est supérieure à celle des gravillons plus gros G_2. Ce phénomène est en relation directe avec l'étendue granulaire des fractions et, dans une certaine mesure, avec l'effet de paroi qui est plus important pour les grains plus gros. Les compacités des sables sont ainsi supérieures de 6 à 10 % par rapport à celles des gravillons G_1 et de 10 à 18 % par rapport à celles des gravillons G_2 ;
- les compacités expérimentale Φ des fillers de El Haoureb, de Jbel Ressas et de Jradou sont comparables entre-elles (de l'ordre de 0,616), alors que celle de Nahli est largement supérieure (le passage à l'état lisse de la pâte se fait alors avec un rapport e/p plus faible). La plus grande étendue granulaire de ce fillers et la présence de l'argile expliquent ce comportement (voir IP dans le Tab. II-IX). A l'inverse, la faible valeur de

la compacité des fillers du sable de El Khlédia s'explique pour des raisons opposées, liée à la nature siliceuse du matériau (la quantité d'eau nécessaire pour l'essai est plus élevée).

II.3.1.3. Résistance mécanique : Essai Los Angeles

Les essais de résistance mécanique des granulats sont utilisés pour s'assurer de la dureté des matériaux. Les essais les plus couramment utilisés sur les granulats mettent en jeu des processus de rupture par fragmentation et d'usure ou attrition par frottement. Dans le cadre de cette étude, seul l'essai Los Angeles qui a été pratiqué pour l'ensemble des granulats. Cet essai, réalisé selon la norme NT 21.21 [32], permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les 6 classes granulaires suivantes : 4/6,3 ; 6,3/10 10/14 10/25 16/31,5 et 25/50. Celle choisie pour les granulats de El Haoureb, de Jbel Ressas, de Jradou et de Tahent est la classe granulaire 6,3/10. Elle est extraite par tamisage de la fraction granulaire G_1 de chacun de ces granulats. Pour les granulats de Aïn Tebournouk (respectivement Nahli), la classe granulaire choisie est 4/6,3 (respectivement 10/14). Selon [32], la charge abrasive introduite dans le tambour de l'essai est constituée de boulets sphériques de fonte ou d'acier. Le nombre de boulets introduits est tributaire de la classe granulaire choisie. Il est de 7 pour la classe 4/6,3 ; 9 pour 6,3/10 et 11 pour 10/14. Le coefficient Los Angeles LA est donnée par la relation suivante :

$$LA = 100 \frac{m}{M} \qquad (23)$$

où m est la masse sèche de la fraction du matériau passant, après l'essai, au tamis 1,6 mm (g) et M est la masse sèche de l'échantillon pour essai, conventionnellement 5000 g.

Les résultats obtenus sont reportés dans le Tab. II-XI. Les valeurs du coefficient LA sont inférieures à la valeur spécifiée par la norme NT 21.30 [8], qui préconise une valeur limite supérieure de 40 pour les granulats destinés à la confection de bétons courants. On notera toutefois que les valeurs de LA de Aïn Tebournouk, de Nahli et de Tahent sont supérieures à celles mesurées sur les gravillons de El Haoureb, de Jbel Ressas et de Jradou, phénomène qui s'explique par la nature de la roche mère. En effet, les roches de Aïn Tebournouk et de Nahli sont caractérisées par la présence d'argile (Tab. II-IX), qui peut fragiliser le matériau. La roche de Nahli est aussi celle qui a la plus forte porosité (Tab. II-VIII). Pour El Haoureb, la valeur trouvée est liée sans doute à la présence de dolomie dans la composition chimique.

En absence de mesures, la résistance à la compression de la roche mère fc_g, dont les granulats sont issus, a été estimée à partir du graphique publié par Tourenq et Arquié [5] valable pour les roches calcaires. Ce graphique relie la résistance fc_g à LA. En première approche, une loi exponentielle a été ajustée aux points (relation 24). Les résultats obtenus pour la roche de Jbel Ressas et de Aïn Tebournouk ont été confrontés aux seules valeurs à disposition fc_g*. Les différences ne dépassent pas 4 MPa, ce qui constitue une bonne approximation. Ils complètent le Tab. II-XI.

$$fc_g = \exp\frac{(133 - LA)}{22} \qquad (24)$$

Tab. II-XI : Valeurs du coefficient Los Angeles et de la résistance à la compression de la roche mère.

Origine	Coupure		Classe granulaire	Nombre de boulets	m (g)	LA	fc_g (MPa)	fc_g^* (MPa)
Aïn Tebournouk	G_1	2/6,3	4/6,3	7	1291,5	26	130	134
Nahli	G_1	10/20	10/14	11	1481	30	108	-
El Haoureb	G_1	5/12,5	6,3/10	9	985,5	20	170	-
Jbel Ressas	G_1	5/12,5	6,3/10	9	1117	22	155	151
Jradou	G_1	3,15/12,5	6,3/10	9	965	19	178	-
Tahent	G_1	5/12,5	6,3/10	9	1611,5	32	99	-

* : valeurs à disposition

II.3.2. Ciment Portland de Le Karrouba CEM II/A-L 32,5

II.3.2.1. Introduction

Le ciment Portland de la cimenterie de Le Karrouba est fabriqué essentiellement à partir d'un mélange approprié de carbonates (calcaire ou craie) à proportion moyenne de 80 % et de 20 %, d'alumine et de silice présentes dans l'argile. Ces matières premières sont broyées, mélangées puis cuites dans un four rotatif à une température voisine de 1450 °C, température où le matériau fond partiellement pour former des nodules appelés clinker. Ce clinker est alors refroidi brusquement puis finement broyé pour former le constituant de base dans l'élaboration des différents ciments. Les principaux constituants du clinker sont [33]:

- silicate tricalcique (Alite), noté C_3S ($3CaO-SiO_2$) ;
- silicate bicalcique (Bélite), noté C_2S ($2CaO-SiO_2$) ;
- aluminate tricalcique (Célite), noté C_3A ($3CaO-Al_2O_3$) ;
- aluminoferrite tétracalcique, noté C_4AF ($4CaO-Al_2O_3-Fe_2O_3$) ;

En présence d'eau, chacun de ces constituants réagit pour former des hydrates qui sont les gels amorphes responsables de la prise puis du durcissement [34]. Ces hydrates sont des silicates et des aluminates calciques hydratés qui ont des coefficients stœchiométriques variables, $C_xS_yH_z$ et $C_xA_yH_z$. Ces derniers sont regroupés sous le terme de CSH et CAH.

II.3.2.2. Composition chimique

L'analyse chimique du clinker a été fournie par la cimenterie de Le Karrouba. Elle est reproduite dans le Tab. II-XII. Par application des formules de Bogue [34], ces données ont permis de déterminer le taux des principaux constituants du clinker. Les résultats obtenus, récapitulés dans le Tab. II-XIII, mentionnent un faible taux de C_3A, facteur qui contrôle dans une certaine mesure l'effet liant des fillers. Ce ciment contient aussi un taux de filler calcaire, à hauteur d'environ 6,3 %, qui dépasse l'intervalle de tolérance acceptable des additions minérales dans les ciments Portlands, soit 5 % selon la norme NF P 15-301 [35]. Le régulateur de prise employé par la cimenterie est le gypse.

Tab. II-XII : Analyse chimique des constituants du clinker.

Composition élémentaire du clinker	Taux (%)
SiO_2	20,14
Al_2O_3	3,28
Fe_2O_3	3,92
MgO	1,28
SO_3	2,71
Na_2O	0,13
K_2O	0,22
CaO	64,19
Perte au feu	4

Tab. II-XIII : Proportion des principaux constituants du ciment de l'étude CEM II/A-L 32,5.

Composition	Taux (%)
C_3S	70,6
C_2S	3,2
C_3A	2,1
C_4AF	11,9
Retardateur (Gypse)	5,8
Filler calcaire	6,3

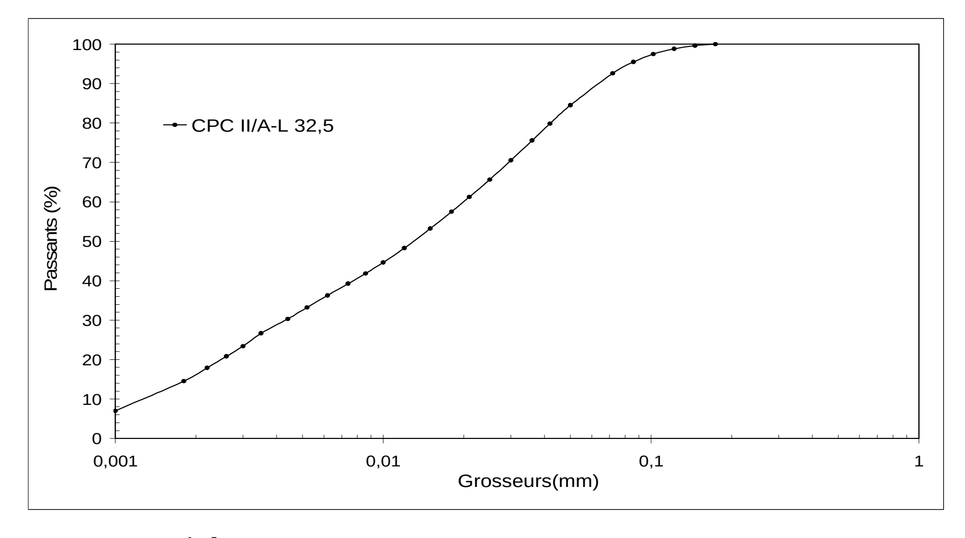
II.3.2.3. Granularité

La granularité du ciment (Tab. II-XIV) a été fournie par la cimenterie. La courbe correspondante est tracée sur la Fig. II-12. Elle a été déterminée par granulométrie Laser (type CILAS 1064 Liquide) [36]. Cette technique, mettant en œuvre une dispersion de la poudre par ultrasons lors des mesures, donne automatiquement la courbe granulométrique défloculée du ciment. Le taux d'éléments fins donné par cette méthode est probablement surestimé, car la mesure est réalisée dans une suspension de l'éthanol. La surface spécifique Blaine du ciment, donnée par le cimentier, est de 380 m^2/kg. Celle des fillers calcaires associés au ciment a été prise, en absence de valeurs, égale à celle du ciment, en première approximation.

Tab. XIV : Granularité du ciment CEM II/A-L 32,5 fournie par le cimentier.

d (µm)	Passants %	d (µm)	Passants %	d (µm)	Passants %	d (µm)	Passants %	d (µm)	Passants %
1	7	4,4	30,29	12	48,29	36	75,6	122	98,83
1,8	14,5	5,2	33,23	15	53,23	42	79,87	146	99,62
2,2	17,9	6,2	36,25	18	57,51	50	84,51	174	100
2,6	20,83	7,4	39,26	21	61,26	72	92,61		
3	23,39	8,6	41,86	25	65,67	86	95,49		
3,5	26,68	10	44,63	30	70,54	102	97,49		

Fig. II-12 : Courbe granulométrique du ciment CEM II/A-L 32,5.



II.3.2.4. Densité

La densité du ciment ρ, donnée par le cimentier, est de 3,19. Elle a été mesurée au pycnomètre selon la norme ASTM C188 [37]. La variation de cette caractéristique d'une production à une autre est faible. Les fillers calcaires, composants du ciment, ont une densité ρ_{fi} de 2,7. La densité du ciment Portland pur ρ_c, calculée selon la relation (25), est alors de 3,223.

$$\rho_c = \frac{\rho - t_{fi} \cdot \rho_{fi}}{1 - t_{fi}} \qquad (25)$$

où t_{fi} est la teneur en fillers calcaires du ciment (t_{fi}=6,3%)

II.3.2.5. Compacité

Comme pour les fillers, des essais de pâte lisse ont été réalisés sur le ciment. La quantité minimale d'eau e, qui permet d'obtenir une pâte lisse et épaisse, est de 83,04 ml en moyenne pour une quantité de ciment de 350 g. Selon la relation (22), la compacité expérimentale Φ est alors de 0,569. Les compacités réelles (α_i = 0,3651) et virtuelles (β_i = 0,4196), supposées uniformes, de chacune des classes élémentaires du ciment ont été obtenues avec René-LCPC et la relation (19). La valeur β_i obtenue se situe dans l'intervalle proposée par [30] ($0,41 < \beta_i < 0,44$). Comparée à la compacité des granulats et des fillers des sables, la compacité β_i du ciment est plus faible. Le Tab. II-XV donne les résultats de sortie du logiciel René-LCPC [28]. Rappelons que les données d'entrées du logiciel sont la compacité réelle de la pâte et la granularité des particules du ciment. Comme les diamètres de référence de la granulométrie laser diffèrent de ceux de René-LCPC, les valeurs des passants ont été interpolées des mesures fournies. Le diamètre moyen définit la moyenne des diamètres des grains passant à travers le tamis d'ouverture d_i.

Tab. II-XV : Données de sortie du logiciel René-LCPC pour le calcul de la compacité α_i des classes élémentaires du ciment CEM II/A-L 32,5.

Masse vol.: 3190 kg/m3 Compacité expérimentale de l'échantillon= 0,569 Mesure effectuée en milieu infini Compacité calculée de l'échantillon= 0,5689 Avec pour indice de compaction 6,7 Compacités propres de la forme: 0,0*ln(d) + 0,3651 pour d<1 µm, sinon 0,3651			
Diamètre (µm)	Passant cumulé (%)	Diamètre moyen (µm)	Compacité
0,1	0	0,112	0,3651
0,125	2,37	0,141	0,3651
0,16	2,67	0,179	0,3651
0,2	3	0,224	0,3651
0,25	3,3	0,281	0,3651
0,315	3,66	0,355	0,3651
0,4	4,36	0,447	0,3651
0,5	5,5	0,561	0,3651
0,63	6,07	0,71	0,3651
0,8	7,66	0,894	0,3651
1	9,43	1,118	0,3651
1,25	10,94	1,414	0,3651
1,6	12,86	1,789	0,3651
2	16,21	2,236	0,3651
2,5	20,75	2,806	0,3651
3,15	24,7	3,55	0,3651
4	29,1	4,472	0,3651
5	34,12	5,612	0,3651
6,3	37,35	7,099	0,3651
8	40,89	8,944	0,3651
10	44,63	11,18	0,3651
12,5	49,25	14,142	0,3651
16	55,38	17,889	0,3651
20	60,84	22,361	0,3651
25	65,67	28,062	0,3651
31,5	71,79	35,496	0,3651
40	78,53	44,721	0,3651
50	84,51	56,125	0,3651
63	89,47	70,993	0,3651
80	94,29	89,443	0,3651
100	97,22	111,803	0,3651
125	100		

II.3.2.6. Résistance à la compression du ciment

Les classes vraies des ciments informent sur la résistance à la compression Rc_t à t jours. Cette résistance est mesurée sur mortier conventionnel (mortier au tiers), conformément à la norme NT 47.30 [38]. La norme NF P 15-301 [35] classe les ciments courants selon leur résistance normale Rc_{28} à 28 jours et suivant leur résistance Rc_2 à 2 jours, dite résistance au jeune âge. Les spécifications du ciment, concernant sa résistance à la compression à 2 jours et à 28 jours, dépendent de la classe à laquelle il appartient [33].

Pour le ciment CEM II/A-L 32,5 de l'étude, la classe vraie a été communiquée par la cimenterie de Le Karrouba aux échéances 1, 3, 7, 14, 28, 90, 180 et 365 jours. Ces données, regroupées dans le Tab. II-XVI, ont été vérifiées expérimentalement aux échéances de 28 et 90 jours. Pour les autres échéances, elles ont été ajustées sur la base d'un modèle semi-logarithmique admis pour la montée en résistance des ciments [30]. La démarche consiste, tout d'abord, à déterminer l'évolution du paramètre cinétique d(t), caractéristique du ciment, en fonction du temps en supposant que cette évolution est linéaire en échelle semi-logarithmique. Elle s'écrit selon la relation suivante :

$$d(t) = A \ \log(t) + B \qquad (26)$$

A et B sont calculées après détermination de d(t) à 28 et 90 jours selon la relation (27), la résistance à la compression à ces échéances étant connue.

$$d(t) = 0,0522\left(\frac{Rc_t}{Rc_{28}} - 1\right) \qquad (27)$$

Dans le cas présent, les valeurs obtenues de A et B sont respectivement 0,0256 et -0, 0371.

Il s'agit ensuite de calculer la résistance à la compression Rc_t aux autres échéances, selon la relation (28) déduite de la relation (27).

$$Rc_t = Rc_{28}\left(\frac{d(t)}{0,0522} + 1\right) \qquad (28)$$

Les valeurs de d(t) et Rc_t à différents âges complètent le Tab. II-XVI. On note une bonne concordance pour les différents âges, excepté à 1 jours ou la résistance calculée est sensiblement supérieure à la valeur donnée par la cimenterie.

Tab. II-XVI : Classes vraies dans le temps du ciment CEM II/A-L 32,5.

Âge (j)	Classes vraies Annoncées Rc_t (MPa)	Classes vraies Calculées Rc_t (MPa)	d(t)
1	7,6	12,81	-0,0371
3	22,7	23,2	-0,0248
7	31,2	31,2	-0,0154
14	37,6	37,75	-0,0077
28	44,3*	44,3	0
90	55,33*	55,33	0,013
180	56	61,88	0,0206
365	65	68,56	0,0285

* valeurs vérifiées expérimentalement

II.4. Conclusion

On a présenté dans ce chapitre les propriétés des constituants nécessaires à la formulation des mélanges hydrauliques (chapitre III). Une description géologique de la roche mère, dont sont issus les granulats, a été donnée tout d'abord. Elle a montré que les formations exploitées avaient des âges assez différents, et que la nature minéralogique des roches était dominée par les calcaires. Le mode de production des granulats dans les carrières est basé sur l'emploi de deux concasseurs à percussion. Le premier sert à fournir le sable, l'autre permet de produire les gravillons. La carrière de El Khlédia exploite une formation siliceuse et elle ne produit que du sable. Le choix du ciment s'est porté sur un produit couramment utilisé dans le district de Tunis, à savoir un ciment CEM II/A-L 32,5 de la cimenterie de Le Karrouba.

L'étude s'est intéressée ensuite aux propriétés des granulats. Les spécifications auxquelles doivent satisfaire ces matériaux pour un usage dans les bétons sont précisées dans la norme tunisienne NT 21.30. Les propriétés physico-mécaniques étudiées sur les granulats ont montré que :

- leur granularité est continue. Celle des gros gravillons G_2 sont plutôt resserrées alors que celles des gravillons intermédiaires G_1 sont plutôt étalées. La forme trapue des grains est favorable pour la mise en œuvre dans les bétons. Les sables S sont assez grossiers et leur module de finesse élevé interdit à priori, selon les normes en vigueur, leur utilisation dans les bétons. Les sables de Nahli et de Aïn Tebournouk présentent en outre des teneurs en fillers qui dépassent le taux admis par la norme (influence sur la formulation, la fabrication et la mise en œuvre des bétons) ;
- les masses volumiques réelles, porosités et absorptions d'eau varient sensiblement d'un matériau à l'autre. L'absorption d'eau des gravillons de Nahli et de Tahent sont fortes, et elle devra être prise en compte au moment de la formulation des bétons ;
- les propretés des sables de Jbel Ressas, de El Haouareb, de Jradou et de El Khlédia sont satisfaisantes, bien que leurs valeurs de bleu soient « hors norme ». Les fines des sables de Aïn Tebournouk de Nahli et de Jradou sont caractérisées par la présence d'argiles ;
- les résistances mécaniques (Los Angeles) sont bonnes. La roche de Aïn Tebournouk, de Nahli et de Tahent est toutefois plus tendre que celle de Jradou, de El Haoureb et de Jbel Ressas ;

- les compacités résiduelles augmentent avec la taille des grains. Les valeurs obtenues s'inscrivent dans les intervalles proposés dans la littérature.

Enfin, certaines caractéristiques du ciment CEM II/A-L 32,5 retenu pour l'étude ont été déterminées. Il s'agit particulièrement de la composition du clinker. Ce ciment est caractérisé par un faible taux de C_3A et une teneur assez élevée de fillers calcaires, qui dépasse la teneur admise pour les ciments Portlands. Une vérification expérimentale des performances mécaniques a permis aussi de montrer une bonne concordance avec les valeurs annoncées par le cimentier aux échéances de 28 et 90 jours.

II.5. Références bibliographiques

[1] Ministère de l'Équipement de l'Habitat - Direction des Carrières et des Explosifs, 1994, "Plan directeur pour le secteur des carrières", Rapport global de SOTINFOR/SERAH, Décembre.

[2] CTMCCV, 1989, "Production et qualité dans les carrières de roches massives à ciel ouvert", Bulletin de CTMCCV, N° 7, Décembre.

[3] Rhimi F., Sarraj H., 2006, "Empilements granulaires et formulation des bétons hydrauliques par le logiciel René-LCPC", Projet de fin d'étude ENIT, Encadreur : Ben Ouezdou M., Achour T., Ben Amor Z., Juin.

[4] Norme NT 47-01, 2005, "Ciment – Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants", INNORPI.

[5] Tourenq C., Arquié G., 1989, "Granulats", Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 717 p.

[6] Norme NF EN 933-1, 1997, "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 10 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage", AFNOR.

[7] Norme NT 21.25, 1990, "Granulats - Détermination de la propreté superficielle", INNORPI.

[8] Norme NT 21.30, 2002, "Granulats - Définitions, conformités, spécifications", INNORPI.

[9] Norme NT 21.19, 1990, "Granulats- Mesure du coefficient d'aplatissement", INNORPI.

[10] Norme NF P 94-057, 1992, "Analyse granulométrique des sols", AFNOR.

[11] Bouassida M., Boussetta S., 2007, "Manuel de travaux pratiques de mécanique des sols", Editions Centre de Publication Universitaire, Imp. Orbis Tunis.

[12] UNPG, 1994, "Recherche taxe parafiscale EG 121 : Points des connaissances sur les bétons calcaires".

[13] Norme NT 21.127, 1990, "Granulats - Détermination de la masse volumique en vrac", INNORPI.

[14] Norme NT 21.94, 1990, "Granulats - Détermination de la masse volumique absolue des fines", INNORPI.

[15] Norme NT 21.04, 1984, "Granulats - Mesures des masses volumiques, porosité, coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux", INNORPI.

[16] Norme NT 21.05, 1984, "Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables", INNORPI.

[17] Bertrandy R., Piketty C., 1996, "Les granulats pour bétons", Extrait de "Les bétons-Bases et donnés pour leur formulation, sous la direction de J. Baron et J P. Ollivier", Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles, Chapitre 3, pp. 65-86.

[18] Norme NT 21.26, 1990, "Granulats - Détermination de la propreté des sables -Equivalent de sable à 10 % de fines", INNORPI.

[19] Norme NF P18-592, 1990, "Granulats - Essai au bleu de méthylène, méthode à la tâche", AFNOR.

[20] Norme NF P94-051, 1992, "Granulats- Limite d'Atterberg et indice de plasticité", AFNOR.

[21] Magnan J. P., Youssefian G., 1989, "Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 159, Réf. 3378, Janvier-Février.

[22] Leroux A., Unikowski Z., 1980, "Mise en évidence de l'influence des fines argileuses dans les granulats à bétons", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 110, Novembre-Décembre, pp.101-108.

[23] Tourenq C., Lan T.N., 1989, "Mise en évidence des argiles par l'essai au bleu de méthylène - Application aux sols, roches et granulats", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 159, Réf. 3376, Janvier-Février.

[24] LCPC- SETRA, 1984, "Spécifications relatives aux granulats pour chaussées", Paris.

[25] de Larrard F., 1999, "Concrete mixture-proportioning", A scientific approach, E et FN SPON, London.

[26] Lecomte A., Mechling J.M., Voirin J., Vulcano N., 2000, "Analyse des propriétés des grains par mesure de la compacité des tranches granulaires", Avril.

[27] Sedran T., de Larrard F., 2000, "Manuel d'utilisation de RENE-LCPC, version 6.1d, logiciel d'optimisation granulaire", Note technique des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Septembre.

[28] Sedran T., de Larrard F., 1994, "RENE-LCPC - Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux du génie civil", Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 194, Novembre-Décembre, pp.87-93.

[29] Ben Aim R., 1970, "Etude de la texture des empilements de grains - Application à la détermination de la perméabilité des mélanges binaires en régime moléculaire, intermédiaire, laminaire", Thèse d'état de l'université de Nancy.

[30] de Larrard F., traduit de l'anglais par A. Lecomte, 2000, "Structures granulaires et formulation des bétons", Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° OA 34, 414 p., Avril.

[31] Sedran T., 1999, "Rhéologie et rhéométrie des bétons - Application à la formulation des bétons autonivelants", Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Mars.

[32] Norme NT 21.21, 1990, "Granulats - Essai los Angeles", INNORPI.

[33] Baron J., Sauterey R., 1982, "Le béton hydraulique - Connaissance et pratique", Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[34] Baron J., Ollivier J P., 1996, "Les bétons-Bases et donnés pour leur formulation", Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles.

[35] Norme NFP 15-301, 1994, "Liants hydrauliques - Ciments courants - Composition, spécifications et critères de conformité", AFNOR.

[36] Meric J.P., Caron J.F., 1973, "Les applications de la granulométrie laser dans l'industrie cimentière", Revue des Matériaux de Construction et de travaux publics n° 676, pp.30-34.

[37] Norme ASTM C188, Norme Américaine sur les granulats, 1988, "Détermination de la masse volumique réelle des fines".

[38] Norme NT 47.30, 1991, "Ciments - Détermination des résistances mécaniques", INNORPI.

Chapitre III

Formulation des mélanges hydrauliques

III.1. Introduction

Les méthodes de formulation des mélanges hydrauliques sont nombreuses. Le principe de base de la plupart d'entre elles repose sur la recherche de la compacité granulaire maximale. Pour cela, certaines méthodes recourent à la mesure de la compacité des constituants et des mélanges, d'autres à « une courbe granulaire de référence » supposée donner la compacité maximale avec les matériaux utilisés. En pratique, il s'agit bien de mettre au point un mélange optimisé de constituants qui non seulement respecte les spécifications des cahiers de charge, mais qui présente aussi le coût minimum.

En Tunisie, jusqu'à ce jour, la méthode pratiquée pour la formulation des mélanges hydrauliques est celle de Dreux [1]. L'application de cette méthode à des mélanges à base de granulats calcaire - cas des granulats provenant des gisements tunisiens étudiés - soulève toutefois certaines réserves quant à son utilisation. En effet, du fait que la méthode ait été calibrée sur des matériaux silico-calcaires de la région parisienne, on observe très régulièrement des différences assez significatives de dosage en eau et de résistance, par rapport aux prévisions. De plus, cette méthode ne prend pas en compte le rôle des additions minérales, tels que les fillers calcaires présents dans les sables de concassage, ni celui de l'air piégé ou des adjuvants (récents) fréquemment utilisés des mélanges hydrauliques. En pratique, cette méthode donne une première approche de la formule du béton, qui nécessite ensuite des ajustements expérimentaux, en réalisant un certain nombre de gâchées d'essais, puis une épreuve d'étude en laboratoire de la formule retenue suivie d'une autre épreuve de convenance sur chantier. Le but cette dernière étape est de vérifier qu'avec les moyens du chantier, il est effectivement possible de réaliser la formule retenue.

Malgré ces « inconvénients », cette méthode a été retenu pour vérifier nos mélanges, car c'est la seule utilisée en Tunisie… Elle nous a permis aussi de confronter ses résultats avec ceux issus du nouveau modèle de formulation proposé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) français, qui prend en compte notamment l'ensemble des propriétés des matériaux du mélange dans la prédiction des comportements. Cependant, plutôt que d'utiliser dès le départ cette méthode pour formuler les différents mélanges envisagés, nous avons choisi de recourir aux formules ayant déjà des références d'emploi chez les partenaires industriels du béton, formules habituellement proposées par le laboratoire CETEC.

On verra toutefois qu'il a était illusoire de considérer que les proportions granulaires et le dosage en eau (pour le moins) restent les mêmes lorsque l'on change les granulats et, en l'occurrence, le gisement. Par conséquent, il faut déjà annoncer que les formules réalisées dans le cadre de cette recherche ne sont pas toutes optimisées du point de vue de la granulométrie et de la compacité. A contrario, cela a permis de s'intéresser à l'influence des proportions granulaires sur les propriétés de résistance des bétons, parallèlement à l'objectif initial de valorisation des matériaux calcaires des carrières dans les bétons.

Le premier objectif de ce chapitre est de présenter les formules et les propriétés des mélanges réalisés avec les matériaux sélectionnés. Les propriétés analysées concernent soit la structure granulaire des mélanges (dosage et rapports *massiques* gravillons/sable *G/S*, teneur en fillers par rapport à la masse granulaire du mélange fi/g), soit leur caractéristique à l'état frais (masse volumique réelle des éprouvettes $MVR_{épr}$, air expérimental $a_{éxp}$, affaissement au cône d'Abrams A), etc.

Le second objectif de ce chapitre est de vérifier dans quelle mesure les formules réalisées (CETEC) coïncident aux distributions granulaires de Dreux. Une comparaison des proportions granulaires est alors établie.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la formulation des mélanges selon l'approche associée aux modèles de LCPC. Après un rappel sommaire de présentation de ces modèles, la mise en œuvre des logiciels BétonlabPro2, René-LCPC et Compac est réalisée sur certains mélanges. Les proportions granulaires optimales retenues (celles donnant la compacité maximale du squelette avec les constituants utilisés) ont été fournies par BétonlabPro2. Elles ont été confrontées à celles des formules réalisées et à celles issues de la méthode Dreux. Notons que la compacité des mélanges a été calculée avec le logiciel René-LCPC. Les indices de serrage (global et partiel) et le potentiel de ségrégation de chaque mélange réalisé ont été déterminés avec le logiciel Compac.

III.2. Formulations retenues

Des formules de mortiers, de micro bétons et de bétons, ayant déjà des références d'emploi [2], ont été proposées par le laboratoire CETEC. Elles présentent un minimum de pâte de ciment et elles ont une consistance plastique S2 selon la norme NF P 18-305 [3], soit un affaissement A au cône d'Abrams [4] compris entre 5 et 9 cm. Les proportions granulaires *volumiques* correspondantes sont données dans le Tab. III-I. Ce tableau est complété par les rapports volumiques gravillons/sable G/S (N.B : on désigne ce rapport en italique s'il s'agit d'un rapport massique).

Les formules ainsi sélectionnées correspondent à des mélanges de performances courantes (des observations faites sur des mélanges réalisés avec ces formules dans divers projets), caractérisés par des rapports massiques eau/ciment E/C et gravillons/sable *G/S* proches respectivement de 0,5 et de 2. Pour les mélanges de Nahli et le micro béton Mixte, on remarquera qu'ils sont plutôt riches en sable, et qu'ils présentent de ce fait des rapports *G/S* plus faible. La résistance de l'ensemble de ces mélanges n'a pas été considérée comme une spécification, et par suite elle n'est pas été considérée comme un critère de sélection; ainsi, les mortiers, qui ne contiennent que du sable, ont des dosages en ciment compris entre 500 et 550 kg/m^3. Les micro bétons contiennent entre 350 et 400 kg de ciment par m^3. Les bétons en contiennent entre 320 et 370 kg/m^3.

Au stade expérimental, les quantités d'eau initialement prévues ont été ajustées pour atteindre la maniabilité de référence S2, en maintenant constantes les proportions volumiques des granulats (Tab. III-I). Cette pratique a conduit à des variations volumiques et, donc, à des dosages différents des constituants qui ont été corrigés par la suite. Certes, cette démarche ne correspond pas à un plan d'expérience rationnel, mais ses conséquences sont toutefois efficaces, puisque les différents mélanges présentent des rapports G/S plutôt ouverts…

Tab. III-I : Proportions *volumiques* des granulats – Formules proposées par le CETEC.

n°		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Granulat		Aïn Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou			Mixtes		
Mélange		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
S	%	100	29,5	32,7	100	38,2	44,1	100	31,4	32,7	100	33,6	32,7	100	35,1	31,2	100	37,7	31,3
G_1		0	70,5	20	0	61,8	17,8	0	68,6	19,8	0	66,4	20,6	0	64,9	28,1	0	62,3	15,3
G_2		0	0	47,3	0	0	38,1	0	0	47,5	0	0	46,7	0	0	40,7	0	0	53,4
G/S			2,39	2,06		1,62	1,27		2,18	2,06		1,98	2,06		1,85	2,21		1,65	2,19

a : mortier ; b : micro béton ; c : béton.

III.2.1. Préparation des matériaux et réalisation des mélanges

Les granulats ont été livrés par camions au département Génie Civil à l'ENIT. Ils ont été déversés en tas sur des bâches, à ciel ouvert. Avant la réalisation d'une gâchée, la quantité de matériaux nécessaire a été prélevée dans chaque tas, en plusieurs point selon les consignes de la norme N FP 18.551 [5] (en partie basse, en partie haute et à l'intérieur du tas). Les matériaux ont été homogénéisés dans un grand bac. La quantité d'eau efficace E_{eff} a été déterminée en tenant compte de l'absorption des granulats et de l'eau apportée par ces derniers. Le volume des gâchées a été fixé à 45 litres, de façon à permettre la réalisation des essais d'affaissement puis la confection de six éprouvettes cylindriques 16×32. Le malaxage des constituants a été effectué dans un malaxeur à axe vertical, en introduisant les constituants dans la cuve, en commençant par le sable, le ciment, et les gravillons. Les mélanges ont été gâchés avec l'eau du robinet. Le même temps de malaxage a été adopté pour toutes les formules (norme NF P 18-404 [6]), soit une minute à sec et deux minutes en présence d'eau. Les mélanges ont été prélevés directement dans la cuve. Les mesures d'affaissement ont été réalisées dix minutes après le début du mélange, délai à l'issu duquel l'absorption est supposée en grande partie satisfaite. D'ailleurs, aucun raidissement significatif n'a été observé sur les mélanges entre la mesure de l'affaissement et la fin du coulage. Les moules ont été remplis en deux fois, chaque couche étant vibrée avec une aiguille vibrante de 25 mm de diamètre [7]. La durée de vibration de chaque couche a été déterminée en fonction de l'affaissement A et de l'angularité du granulat, en se basant sur les abaques présentés dans la référence [8]. Les faces supérieures des éprouvettes ont été lissées soigneusement avec une règle en acier. Chaque éprouvette a été recouverte ensuite par un film en polyéthylène pour éviter la dessiccation, puis placée dans le local « F2 » du laboratoire du département Génie Civil où la température ambiante est de l'ordre de 20°C. Le démoulage a été effectué avec soin au bout de 24 heures. Juste après cette opération, les premières éprouvettes ont été

transportées au CETEC pour subir les essais de résistance à la compression et à la traction, et les mesures complémentaires du module d'élasticité. Les autres éprouvettes ont été conservées dans le bassin d'eau situé en F2 (température de 20 °C) jusqu'aux échéances de 3, 7, 14, 28, 90, 180 et 365 jours. Les essais cités précédemment ont été pratiqués aux échéances correspondantes. Le transport des éprouvettes, entre l'ENIT et le CETEC (6 km environ), a été effectué avec soin, en évitant tout choc.

Pour une nature de granulat, la fabrication du mortier, du micro béton et du béton a nécessité chacun le coulage de 40 éprouvettes : 3 éprouvettes pour mesurer le module d'élasticité et la résistance à la compression aux échéances données ; 2 autres pour mesurer la résistance à la traction aux mêmes échéances. Le nombre total d'éprouvettes ainsi réalisées s'élève à 720 unités.

Une fiche expérimentale de formulation a été établie sous-Excel pour chaque mélange. Elle a permis de déterminer les pesées à réaliser pour chaque constituant. Les propriétés du mélange à l'état frais sont aussi reportées sur cette fiche.

III.2.2. Calcul des formules expérimentales

Dix huit formules de mortiers, de micro bétons et de bétons ont été réalisées avec les matériaux retenus, utilisés tels quels (pas de lavage des granulats). Le calcul relatif aux diverses formulations, en tenant compte des propriétés des granulats, est présenté par carrière sur les fiches de la Fig. III-1. Pour le mélange mixte, le mortier a été réalisé avec le sable S de El Khlédia, le micro béton avec le sable précédent et le gravillon G_1 de Tahent, et le béton avec ces deux derniers matériaux et le gravillon G_2 de Nahli. D'une manière générale, ni ségrégation, ni ressuage notables n'ont été observés sur les mélanges qui avaient tous une consistance plastique. Chaque fiche comprend les détails suivants :

- désignation de la gâchée et date de fabrication ;
- pourcentages volumiques et massiques des granulats, selon les données du CETEC ;
- quantités de ciment C et quantité d'eau E ajustée expérimentalement afin d'atteindre une consistance plastique marquée par un affaissement A compris entre 50 et 90 mm. Ces quantités sont déterminées pour une gâchée d'un volume unité (1 mètre cube) ;
- formule pondérale du mélange pour une gâchée d'un mètre cube en tenant compte des corrections liées aux propriétés des constituants (masse volumique, teneur en eau et absorption d'eau). La quantité d'eau efficace E_{eff} est égale à la quantité d'eau

directement introduite dans le malaxeur $E_{ajoutée}$, augmentée de la masse d'eau totale apportée par les granulats $E_{apportée}$ et diminuée de la masse d'eau satisfaisant l'absorption $E_{absorbée}$. A l'exception du sable de Aïn Tebournouk, il n'y avait pas d'eau apportée par les granulats, puisqu'ils étaient avant formulation séchés à l'étuve à 90 °C jusqu'à masse constante. D'une manière générale, la valeur de $E_{apportée}$ (différente de zéro pour les mélanges de Aïn Tebournouk) et celle de $E_{absorbée}$ sont données respectivement par les relations (1) et (2) suivantes :

$$E_{apportée} = \sum_{i=(S,G_1,G_2)} M_i * W_i \tag{1}$$

où M_i est la masse du granulat i en kg
W_i est la teneur en eau du granulat i en kg

$$E_{absorbée} = \sum_{i=(S,G_1,G_2)} M_i * Ab_i \tag{2}$$

où Ab_i est le coefficient d'absorption du granulat i

On en déduit la masse d'eau efficace selon la relation suivante :

$$E_{eff} = E_{ajoutée} + E_{apportée} - E_{absorbée} \tag{3}$$

- quantité relative à une gâchée au laboratoire (45 litres) ;
- mesures expérimentales sur mélanges frais, en l'occurrence l'affaissement au cône d'Abrams A et la masse volumique mesurée par pesée des éprouvettes 16×32 ;
- proportions réelles des constituants au moment de la gâchée, ajustées à un mètre cube de mélange frais. Le volume d'air piégé théorique $a_{thé}$ dans les mélanges a été estimé à partir des quantités (kg/m^3) de sable M_S et de gravillons M_G (dépourvus de fillers), selon la relation proposée par [9], rappelée ci-dessous :

$$a_{thé} = (1 - 0,00222A)(-0,000988M_G + 0,00368M_S) \tag{4}$$

Le volume théorique ainsi trouvé a été comparé, pour vérification, au volume d'air expérimental $a_{éxp}$ déduit de la pesée des éprouvettes, calculé par comparaison de la masse volumique réelle $MVR_{épr}$ et de la masse volumique théorique des mélanges $MVR_{thé(m)}$ [10]. Le calcul de $a_{éxp}$ se fait selon la relation suivante :

$$a_{éxp} = 1000\left(1 - \frac{MVR_{épr}}{MVR_{thé(m)}}\right) \tag{5}$$

La masse $MVR_{thé(m)}$ correspond au rapport de la masse des ingrédients introduits dans le malaxeur sur le volume réel de ces ingrédients (solides et liquides).

Les valeurs obtenues de $a_{éxp}$ ont été toujours proches des valeurs théoriques $a_{thé}$, qui ont été gardées pour ajuster les quantités réelles de chaque ingrédient dans le référentiel du volume unité, par ajustement des volumes partiels réalisés. Le calcul se fait par une règle de trois après déduction du volume d'air piégé. Ainsi le volume de chaque constituant q_i, en litre pour 1 m^3 de mélange est déduit de la relation suivante :

$$q_i = \frac{(1000 - a_{thé})\ q'_i}{q'_t - a_{thé}} \qquad (6)$$

où q'_i est le volume du constituant i dans la formule de départ

q'_t est le volume total des constituants dans la formule de départ.

Fig. III-1 : Fiche expérimentale des mélanges des granulats de chaque carrière.

III.2.2.1. Aïn Tebournouk

Propriétés des matériaux

	MVR kg/m³	Ab %	W %
C	3190		
E	1000		
S	2630	2,02	2,94
G_1	2630	2,6	0
G_2	2620	3,15	0

Mortier (Date de fabrication : 23/05/2005)
Désignation : Mo . T

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			593	100	593	1559,4	100
G_1				0	0	0	0
G_2				0	0	0	0
C	469,2	147		Total	593	1559,4	
E	260	260					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	57,5		57,5	71
G_1	0		0	
G_2	0		0	
		C	21,1	
		$E_{ajoutée}$	11,7	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'_i l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	1278	486		486	520	1367	2231
G_1	0	0		0	0	0	
G_2	0	0		0	0	0	
C	469	147		147	157	502	
$E_{ajoutée}$	260	260	E_{eff}	272	291	291	
			$a_{thé}$	32,6	32,6		
			Total	937	1000	2159	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	13,80
$MVR_{épr}$	kg/m³	2156

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	33,7

Micro béton (Date de fabrication : 25/05/2005)
Désignation : Mi . T

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			630	29,5	185,8	488,7	29,5
G_1				70,5	443,7	1167	70,5
G_2				0	0	0	0
C	368,2	115		Total	629,6	1655,8	
E	255	255					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	20,2		20,2	76,5
G_1	48,3		48,3	
G_2	0		0	
		C	16,6	
		$E_{ajoutée}$	11,5	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'_i l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	450	171		171	182	479	2278
G_1	1074	408		408	435	1143	
G_2	0	0		0	0	0	
C	368	115		115	123	392	
$E_{ajoutée}$	255	255	E_{eff}	242	257	257	
			$a_{thé}$	2,8	2,8		
			Total	939	1000	2272	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	14,54
$MVR_{épr}$	kg/m³	2272

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	2,76

Béton (Date de fabrication : 27/05/2005)
Désignation : B . T

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			645	32,7	210,9	554,7	23,8
G_1				20	129,3	340	14,6
G_2				47,3	304,9	798,7	34,3
C	328,5	103		Total	645	1693,4	
E	252	252					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	24,1		24,1	75
G_1	14,8		14,8	
G_2	34,7		34,7	
		C	14,8	
		$E_{ajoutée}$	11,3	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'_i l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	535,9	204		204	217	571	2325
G_1	328	125		125	133	350	
G_2	772	295		295	314	822	
C	328,5	103		103	110	350	
$E_{ajoutée}$	252	252	E_{eff}	208	222	222	
			$a_{thé}$	4,6	4,6		
			Total	939	1000	2314	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	14,80
$MVR_{épr}$	kg/m³	2313

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	5,44

III.2.2.2. Nahli

Propriétés des matériaux

	MVR kg/m³	Ab %	W %
C	3190		
E	1000		
S	2550	6,8	0
G_1	2531	7,31	0
G_2	2562	7,7	0

Mortier (Date de fabrication : 13/06/2005)
Désignation : Mo . N

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			500	100	500	1273,9	100
G_1				0	0	0	0
G_2				0	0	0	0
C	479,8	150		Total	500	1273,9	
E	350	350					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	48,4		48,4	85
G_1	0		0	
G_2	0		0	
		C	21,6	
		$E_{ajoutée}$	15,8	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	1075	421		421	485	1236	2158
G_1	0	0		0	0	0	
G_2	0	0		0	0	0	
C	480	150		150	173	552	
$E_{ajoutée}$	350	350	E_{eff}	277	319	319	
			$a_{thé}$	23,4	23,4		
			Total	872	1000	2107	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	13,50
$MVR_{épr}$	kg/m³	2109

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	22,4

Micro béton (Date de fabrication : 15/06/2005)
Désignation : Mi . N

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			599	38,2	228,5	582,7	38,3
G_1				61,8	370,2	937,0	61,7
G_2				0	0	0	0
C	334,2	105		Total	598,7	1519,7	
E	296,5	297					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	26,5		26,5	79,5
G_1	42,6		42,6	
G_2	0		0	
		C	15,0	
		$E_{ajoutée}$	13,3	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	589	231		231	256	653	2293
G_1	947	374		374	415	1050	
G_2	0	0		0	0	0	
C	334	105		105	116	370	
$E_{ajoutée}$	296,5	297	E_{eff}	187	207	207	
			$a_{thé}$	5,8	5,8		
			Total	903	1000	2280	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	14,60
$MVR_{épr}$	kg/m³	2281

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	5,28

Béton (Date de fabrication : 17/06/2005)
Désignation : B . N

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			565	44,1	249,2	635,5	44,1
G_1				17,8	100,4	254,2	17,6
G_2				38,1	215	550,8	38,2
C	336,2	105		Total	564,6	1440,5	
E	330	330					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	37,8		37,8	80
G_1	15,1		15,1	
G_2	32,8		32,8	
		C	15,1	
		$E_{ajoutée}$	14,9	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	840,4	330		330	312	797	2330
G_1	336	133		133	126	319	
G_2	728	284		284	269	690	
C	336,2	105		105	100	319	
$E_{ajoutée}$	330	330	E_{eff}	192	182	182	
			$a_{thé}$	10,2	10,2		
			Total	1054	1000	2306	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	14,75
$MVR_{épr}$	kg/m³	2305

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	10,9

III.2.2.3. El Haoureb

Propriétés des matériaux

	MVR kg/m³	Ab %	W %
C	3190		
E	1000		
S	2760	0,91	0
G_1	2746	0,95	0
G_2	2780	0,98	0

Mortier (Date de fabrication : 30/05/2005)

Désignation : Mo . H

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			622	100	622	1717,2	100
G_1				0	0	0	0
G_2				0	0	0	0
C	463,6	145		Total	622	1717,2	
E	232,5	233					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	59,5		59,5	76,5
G_1	0		0	
G_2	0		0	
		C	20,9	
		$E_{ajoutée}$	10,5	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	1322	479		479	547	1510	2375
G_1	0	0		0	0	0	
G_2	0	0		0	0	0	
C	464	145		145	166	529	
$E_{ajoutée}$	232,5	233	E_{eff}	220	252	252	
			$a_{thé}$	35,1	35,1		
			Total	880	1000	2291	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	14,64
$MVR_{épr}$	kg/m³	2288

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	36,7

Micro béton (Date de fabrication : 01/06/2005)

Désignation : Mi . H

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			678	31,4	213	587,8	31,5
G_1				68,6	465,1	1277,1	68,5
G_2				0	0	0	0
C	341,1	107		Total	678,1	1864,9	
E	215	215					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	23,6		23,6	71
G_1	51,2		51,2	
G_2	0		0	
		C	15,4	
		$E_{ajoutée}$	9,7	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	524	190		190	207	572	2419
G_1	1137	414		414	453	1244	
G_2	0	0		0	0	0	
C	341	107		107	117	373	
$E_{ajoutée}$	215	215	E_{eff}	199	218	218	
			$a_{thé}$	4,7	4,7		
			Total	915	1000	2407	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	15,41
$MVR_{épr}$	kg/m³	2408

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	4,43

Béton (Date de fabrication : 03/06/2005)

Désignation : B . H

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			683	32,7	223	615,5	35,8
G_1				19,8	135,1	371	21,6
G_2				47,5	324,4	901,9	52,5
C	342,8	107		Total	682,5	1888,4	
E	210	210					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	25,6		25,6	73
G_1	15,4		15,4	
G_2	37,5		37,5	
		C	15,4	
		$E_{ajoutée}$	9,5	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	568,7	206		236	242	624	2393
G_1	343	125		115	118	283	
G_2	833	300		401	412	1055	
C	342,8	107		86	89	283	
$E_{ajoutée}$	210	210	E_{eff}	131	134	134	
			$a_{thé}$	5,6	5,6		
			Total	975	1000	2379	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	15,58
$MVR_{épr}$	kg/m³	2435

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	5,75

III.2.2.4. Jbel Ressas

Propriétés des matériaux

	MVR kg/m³	Ab %	W %
C	3190		
E	1000		
S	2670	0,29	0
G_1	2660	0,31	0
G_2	2680	0,35	0

Mortier (Date de fabrication : 06/06/2005)

Désignation : Mo . R

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			615	100	615	1642,9	100
G_1				0	0	0	0
G_2				0	0	0	0
C	501,4	157		Total	615	1642,9	
E	227,5	228					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	61,9		61,9	106
G_1	0		0	
G_2	0		0	
		C	22,6	
		$E_{ajoutée}$	10,2	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	1375	515		515	555	1482	2345
G_1	0	0		0	0	0	
G_2	0	0		0	0	0	
C	501	157		157	169	540	
$E_{ajoutée}$	227,5	228	E_{eff}	224	241	241	
			$a_{thé}$	34,4	34,4		
			Total	930	1000	2264	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	14,52
$MVR_{épr}$	kg/m³	2269

Air expérimental

a_{exp}	l	32,3

Micro béton (Date de fabrication : 08/06/2005)

Désignation : Mi .R

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			682	33,6	229,5	612,7	33,7
G_1				66,4	452,6	1204	66,3
G_2				0	0	0	0
C	336,2	105		Total	682,1	1816,7	
E	212,5	213					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	24,9		24,9	76
G_1	48,9		48,9	
G_2	0		0	
		C	15,1	
		$E_{ajoutée}$	9,6	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	553	207		207	222	592	2352
G_1	1087	409		409	437	1163	
G_2	0	0		0	0	0	
C	336	105		105	113	360	
$E_{ajoutée}$	212,5	213	E_{eff}	208	222	222	
			$a_{thé}$	6,3	6,3		
			Total	935	1000	2337	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	14,94
$MVR_{épr}$	kg/m³	2334

Air expérimental

a_{exp}	l	7,29

Béton (Date de fabrication : 10/06/2005)

Désignation : B . R

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			718	32,7	234,9	627,2	32,7
G_1				20,6	147,7	392,8	20,5
G_2				46,7	335,3	898,7	46,8
C	325,0	102		Total	717,9	1918,6	
E	180,25	180					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	26,0		26,0	85,5
G_1	16,3		16,3	
G_2	37,2		37,2	
		C	14,6	
		$E_{ajoutée}$	8,1	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	577,3	216		216	229	612	2417
G_1	362	136		136	144	383	
G_2	827	309		309	327	877	
C	325,0	102		102	108	345	
$E_{ajoutée}$	180,3	180	E_{eff}	175	185	185	
			$a_{thé}$	5,9	5,9		
			Total	943	1000	2403	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	15,42
$MVR_{épr}$	kg/m³	2409

Air expérimental

a_{exp}	l	3,29

III.2.2.5. Jradou

Propriétés des matériaux

	MVR kg/m³	Ab %	W %
C	3190		
E	1000		
S	2638	0,6	0
G_1	2390	2,6	0
G_2	2484	2	0

Mortier (Date de fabrication : 27/06/2005)
Désignation : Mo . J

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			456	100	456	1203	100
G_1				0	0	0	0
G_2				0	0	0	0
C	620,9	195		Total	456	1203,0	
E	349,33	349					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	67,7		67,7	57
G_1	0		0	
G_2	0		0	
		C	27,9	
		$E_{ajoutée}$	15,7	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'_i l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	1505	571		571	493	1302	2231
G_1	0	0		0	0	0	
G_2	0	0		0	0	0	
C	621	195		195	168	537	
$E_{ajoutée}$	349,3	349	E_{eff}	340	294	294	
			$a_{thé}$	44,0	44,0		
			Total	1150	1000	2133	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	13,68
$MVR_{épr}$	kg/m³	2138

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	41,9

Micro béton (Date de fabrication : 29/06/2005)
Désignation : Mi . J

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			585	35,1	205,4	541,9	37,4
G_1				64,9	380	908,2	62,6
G_2				0	0	0	0
C	379,7	119		Total	585,4	1450,1	
E	295,56	296					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	28,9		28,9	62
G_1	48,4		48,4	
G_2	0		0	
		C	17,1	
		$E_{ajoutée}$	13,3	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'_i l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	450	171		243	224	591	2194
G_1	1074	408		450	414	990	
G_2	0	0		0	0	0	
C	368	115		119	110	350	
$E_{ajoutée}$	255	255	E_{eff}	264	243	243	
			$a_{thé}$	9,4	9,4		
			Total	1085	1000	2173	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	13,91
$MVR_{épr}$	kg/m³	2173

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	9,24

Béton (Date de fabrication : 01/07/2005)
Désignation : B . J

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			624	31,2	194,5	513,1	32,8
G_1				28,1	175,5	419,4	26,8
G_2				40,7	253,9	630,6	40,3
C	353,1	111		Total	623,9	1563,1	
E	265,44	265					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	26,4		26,4	56
G_1	21,5		21,5	
G_2	32,4		32,4	
		C	15,9	
		$E_{ajoutée}$	11,9	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'_i l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	585,7	222		222	208	550	2243
G_1	479	200		200	188	449	
G_2	720	290		290	272	676	
C	353,1	111		111	104	331	
$E_{ajoutée}$	265,4	265	E_{eff}	235	221	221	
			$a_{thé}$	6,9	6,9		
			Total	1065	1000	2227	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	14,28
$MVR_{épr}$	kg/m³	2231

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	5,08

III.2.2.6. Mixtes

Propriétés des matériaux

	MVR kg/m³	Ab %	W %
C	3190		
E	1000		
S	2580	1,7	0
G_1	2404	9,83	0
G_2	2562	7,7	0

Mortier (Date de fabrication : 20/06/2005)

Désignation : Mo . K

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			533	100	533	1374,6	100
G_1				0	0	0	0
G_2				0	0	0	0
C	413,8	130		Total	533	1374,6	
E	337,5	338					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	70,9		70,9	68,5
G_1	0		0	
G_2	0		0	
		C	18,6	
		$E_{ajoutée}$	15,2	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	1576	611		611	556	1434	2188
G_1	0	0		0	0	0	
G_2	0	0		0	0	0	
C	414	130		130	118	377	
$E_{ajoutée}$	337,5	338	E_{eff}	311	283	283	
			$a_{thé}$	43,3	43,3		
			Total	1094	1000	2094	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	13,46
$MVR_{épr}$	kg/m³	2103

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	38,9

Micro béton (Date de fabrication : 22/06/2005)

Désignation : Mi . K-T

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			664	37,7	250,2	645,4	39,3
G_1				62,3	414,2	995,8	60,7
G_2				0	0	0	0
C	233,2	73		Total	664,4	1641,3	
E	262,5	263					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	33,4		33,4	89
G_1	51,5		51,5	
G_2	0		0	
		C	10,5	
		$E_{ajoutée}$	11,8	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	742	288		288	292	753	2317
G_1	1145	476		476	484	1163	
G_2	0	0		0	0	0	
C	233	73		73	74	237	
$E_{ajoutée}$	262,5	263	E_{eff}	137	140	140	
			$a_{thé}$	10,6	10,6		
			Total	985	1000	2292	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	14,70
$MVR_{épr}$	kg/m³	2297

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	8,7

Béton (Date de fabrication : 24/06/2005)

Désignation : B . K-T-N

Pourcentages volumiques et massiques des constituants (CETEC)

	M kg	V l	V_{rest} l	vol. %	V l	M kg	mas. %
S			666	31,4	208,9	538,9	31,8
G_1				15,3	101,6	244,2	14,4
G_2				53,4	355,6	911,1	53,8
C	275,7	86		Total	666,1	1694,2	
E	247,5	248					
Total	1000						

Formule du mélange à réaliser sur gâchée de 45l et mesure d'affaissement A sur mélange frais

	M kg		M kg	A mm
S	27,4		27,4	100
G_1	12,4		12,4	
G_2	46,3		46,3	
		C	12,4	
		$E_{ajoutée}$	11,1	

Formule du mélange ramenée au m³

	M kg	V l		Formule de départ q'ᵢ l	Formule au m³ q_i l	Formule au m³ M_i kg	$MVR_{thé(m)}$ kg/m³
S	608,3	236		236	242	624	2393
G_1	276	115		115	118	283	
G_2	1028	401		401	412	1055	
C	275,7	86		86	89	283	
$E_{ajoutée}$	247,5	248	E_{eff}	131	134	134	
			$a_{thé}$	5,6	5,6		
			Total	975	1000	2379	

Mesures sur éprouvettes de mélange frais

$M_{épr}$	kg	15,20
$MVR_{épr}$	kg/m³	2375

Air éxpérimental

$a_{éxp}$	l	7,43

III.2.3. Commentaires sur les mélanges réalisés

Les propriétés des mélanges réalisés sont reprises dans le Tab. III-II. En considérant les rapports E_{eff}/C, on constate que les mélanges, à l'exception des mortiers de El Haoureb et de Jbel Ressas et du béton mixte, ont des valeurs supérieures à 0,5. Ils varient entre 0,6 et 0,9. Pour satisfaire la maniabilité visée avec les matériaux sélectionnés, une quantité d'eau plus élevée que celle prévue par les mélanges du CETEC a dû être utilisée avec les matériaux de « nos carrières ». La plus forte absorption des granulats, par rapport à ceux habituellement utilisés par le CETEC, est à considérer à ce stade. De même, les compacités granulaires n'étant généralement pas optimales, les mélanges demandent alors plus de pâte pour parvenir à la suspension, et donc plus d'eau, à ciment constant. Enfin, les mélanges contiennent pour la plupart des sables riches en fillers. La présence de ces fillers augmente manifestement aussi la demande en eau. Les valeurs fi/g, qui représentent le rapport de la masse de fillers fi à la masse de la fraction granulaire g supérieure à 80 µm, complètent le Tab. III-II. Pour les mortiers, ce taux est assez élevé. Par exemple, pour Nahli, il est de 41 % alors que pour Aïn Tebournouk, il (n')est (que) de 25 %. Pour les micro bétons, ce rapport est moins élevé. Il atteint 18 % pour Nahli et 10 % pour Aïn Tebournouk. Enfin ce rapport est plus faible encore pour les bétons, à l'exception de Nahli dont les gravillons contiennent une fraction non négligeable d'éléments fins. Le rapport fi/g de ce dernier est de 17 %.

Tab. III-II : Formules et propriétés des mélanges réalisés.

			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Granulat		Aïn Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou			Mixtes		
	Mélange		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Dosages	C	kg/m^3	502	392	350	552	370	319	529	373	366	540	360	345	537	350	331	377	237	283
	E_{eff}		291	257	222	319	207	182	252	218	206	241	222	185	294	243	221	283	140	134
	S		1367	479	571	1236	653	797	1510	572	607	1482	592	612	1302	591	550	1434	753	624
	G_1		0	1143	350	0	1050	319	0	1244	366	0	1163	383	0	990	449	0	1163	283
	G_2		0	0	822	0	0	690	0	0	890	0	0	877	0	0	676	0	0	1055
Propriétés	$MVR_{épr}$		2156	2272	2313	2109	2281	2305	2288	2408	2435	2269	2334	2409	2138	2173	2231	2103	2297	2375
	$a_{éxp}$	l	33,7	2,8	5,4	22,4	5,3	10,9	36,7	4,4	5,8	32,3	7,3	3,3	41,9	9,3	5,1	38,9	8,7	7,4
	$a_{thé}$	l	32,6	2,8	4,6	23,4	5,8	10,2	35,1	4,7	5,6	34,4	6,3	5,9	44	9,4	6,9	43,3	10,6	5,6
	A	mm	71	76,5	75	85	79,5	80	76,5	71	73	106	76	85,5	57	62	56	68,5	89	100
	E_{eff}/C		0,58	0,66	0,63	0,58	0,56	0,57	0,48	0,58	0,56	0,45	0,62	0,54	0,55	0,69	0,67	0,75	0,59	0,47
	G/S			2,39	2,05		1,61	1,27		2,17	2,07		1,96	2,06		1,68	2,05		1,54	2,14
	fi/g		0,25	0,10	0,09	0,41	0,18	0,17	0,18	0,07	0,06	0,15	0,06	0,06	0,13	0,06	0,05	0,16	0,09	0,07

a : mortier ; b : micro béton ; c : béton.

Les formules réalisées ont finalement des proportions de constituants assez variables. La conséquence est qu'elles présentent des rapports fi/g très ouverts selon le type de mélange et le taux de fillers des sables utilisés. Ces formules n'ont pas toujours les caractéristiques attendues. Par exemple, pour le dosage en ciment choisi, les rapports E_{eff}/C des mélanges de Nahli devraient être assez élevés, en raison de la demande en eau généralement tributaire de la quantité de fillers présentes et de la porosité importante des granulats. Or, il s'avère que ce n'est pas le cas… Un autre paramètre intervient donc dans le contrôle de la maniabilité. Il peut s'agir de la compacité « favorable » des fillers est des grains…

Enfin, précisons que les formules du CETEC, utilisées telles qu'elles avec nos matériaux, n'ont pas données des résultats sur les rapports E_{eff}/C conformes aux spécifications initiales. Ce résultat met en évidence l'importance du rôle des fillers dans les mélanges. De nouvelles formulations selon la méthode Dreux ont alors été établies et comparées aux mélanges réalisés. Cette procédure a été répétée avec les formules données par les modèles d'optimisation du LCPC, qui prennent en compte les propriétés morphologiques des matériaux pour trouver les proportions optimales.

III.3. Formulation des mélanges selon la méthode Dreux

III.3.1. Principe de formulation

Selon l'approche de Dreux [11], les proportions des constituants granulaires du mélange (sans le ciment) sont définies à partir d'une courbe granulaire de référence OAB. Cette courbe est issue de l'observation du comportement expérimental de « bons » bétons ayant donnés satisfactions. Elle ne se réfère à aucune théorie, bien que la courbe granulaire ressemble à celle proposée par Caquot [12]. La compacité maximale est alors supposée atteinte lorsque la courbe du mélange réel coïncide avec cette courbe de référence.

La construction de la courbe repose sur des abaques et des tableaux tirés de l'expérience, qui sont habituellement admis comme référence pour décrire le comportement des bétons courants. Pour déterminer les proportions volumiques des constituants granulaires, seul objectif ici de l'application de la méthode, deux étapes doivent être effectuées [11] :

1. tracer la courbe granulaire de référence OAB sur le graphique granulométrique : selon Dreux, quelque soit le nombre de granulats, la courbe granulaire de référence du mélange est représentée par deux segments de droite. Trois points suffisent alors pour la tracer : O l'origine, A le point de brisure et B l'extrémité. Les points O et B sont invariants quelque soient les mélanges; le point O a pour coordonnées (0,08 ; 0 % de passants) et le point B (D ; 100 % de passants). D est le diamètre du gros gravillon. Si D≤20mm, le point A a pour cordonnées (D/2 ; $50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$); si D>20mm, l'abscisse du point A est (5+D)/2 et l'ordonnée est la même que précédemment. Les valeurs de K et K_p sont estimées à partir des tableaux associés à la méthode. Elles tiennent compte de la forme des granulats, du dosage en ciment, de la vibration et du mode de mise en œuvre du béton. K_s est déduit du module de finesse du sable (MF est compris entre 2,2 et 2,8) selon la relation suivante :

$$K_s = 6\ \text{MF} - 15 \qquad (7)$$

2. ayant tracé la courbe granulaire de référence sur le diagramme granulométrique, qui comporte aussi les courbes granulométriques des matériaux, il s'agit ensuite de trouver les proportions volumiques des différents granulats dans le mélange. Elles sont trouvées par une interpolation graphique appelée « lignes de partage ». Ces lignes relient le point 95 % (passants) d'un granulat au point 5 % du granulat suivant. Les points d'intersection

entre ces lignes et la courbe granulaire de référence donnent directement les proportions respectives des granulats, en pourcentage du volume réel des constituants granulaires.

III.3.2. Dosages volumiques des granulats

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse a été appliquée aux micro bétons et aux bétons réalisés avec les granulats de chaque carrière. Les valeurs du module de finesse MF des sables et les coefficients K, K_s et K_p pour chaque mélange sont donnés dans le Tab. III-III. Pour déterminer les valeurs de K, il a été considéré un dosage en ciment égal à celui des mélanges réalisés (Tab. III-II) et une vibration normale pour le mode de mise en place. La valeur de K_p a été prise égale à 0, car les mélanges n'ont pas été pompés. Les courbes granulaires de référence OAB pour chaque carrière ainsi que les lignes de partage sont tracées sur la Fig. III-2. Les résultats des proportions volumiques des granulats sont récapitulés dans le Tab. III-IV. Les rapports volumiques gravillons/sable obtenus $(G/S)_{Dreux}$ et ceux réalisés à partir des formules du CETEC $(G/S)_{réel}$, complètent ce tableau. Les courbes des différents mélanges granulaires (formules réalisées, formules selon Dreux) complètent la Fig. III-2.

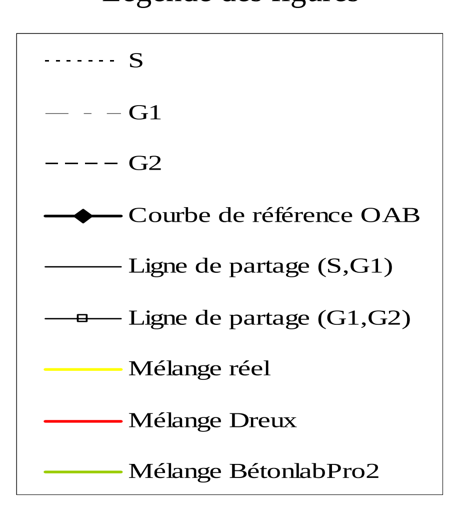
Tab. III-III : Module de finesse des sables et des paramètres K, K_s et K_p (méthode de Dreux).

	Aïn Tebournouk		Nahli		El Haoureb		Jbel Ressas		Jradou		Mixte	
Mélange	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c
MF	2,98		2,38		2,94		3,41		3,43		1,26	
K	0	2	1	3	1	1	2	2	2	3	6	4
K_s	2,88		-0,72		2,64		5,46		5,58		-7,44	
K_p	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

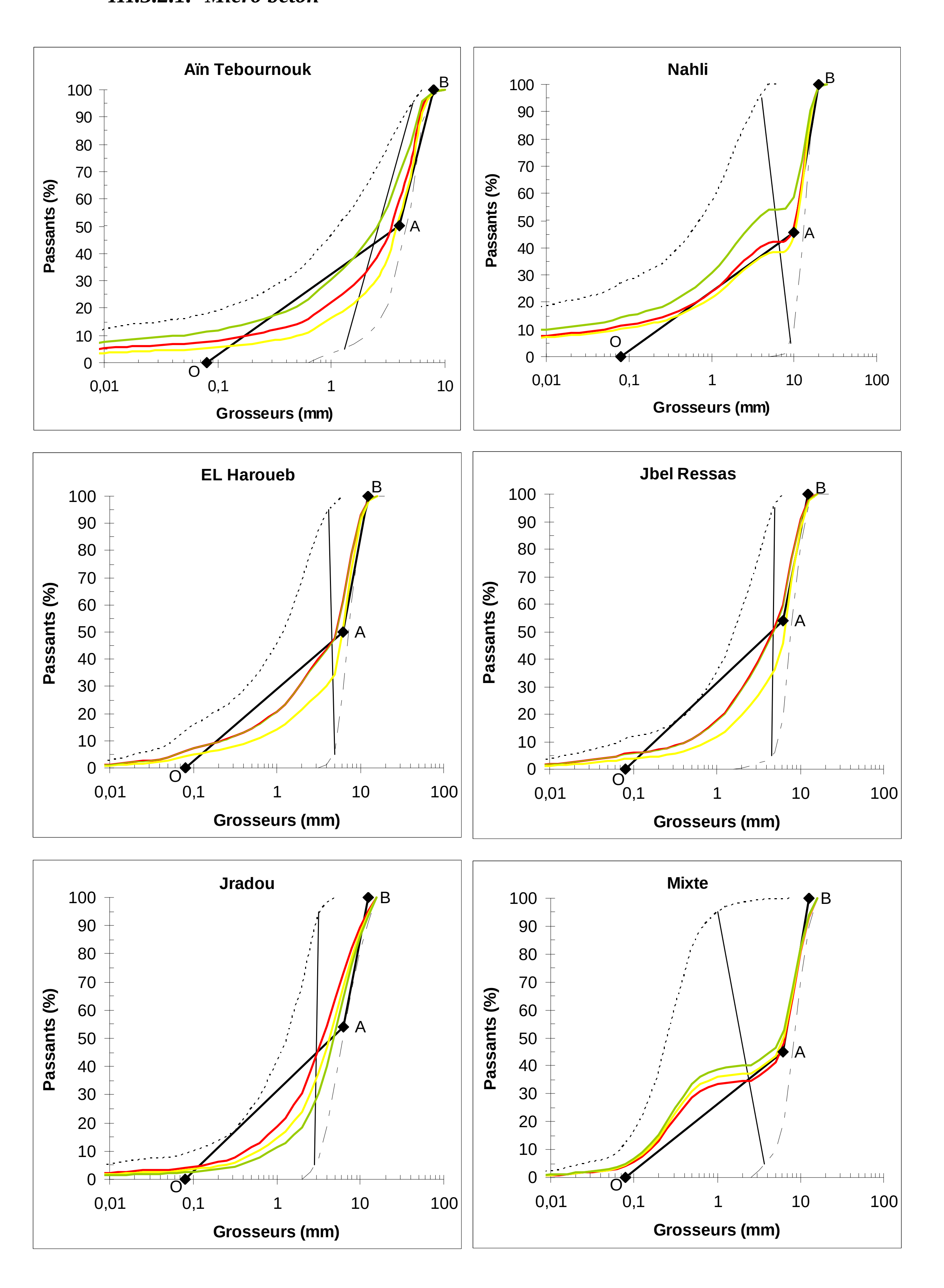
b : micro béton ; c : béton.

Fig. III-2 : Méthode Dreux-Gorisse appliquée aux micro bétons et bétons de chaque carrières

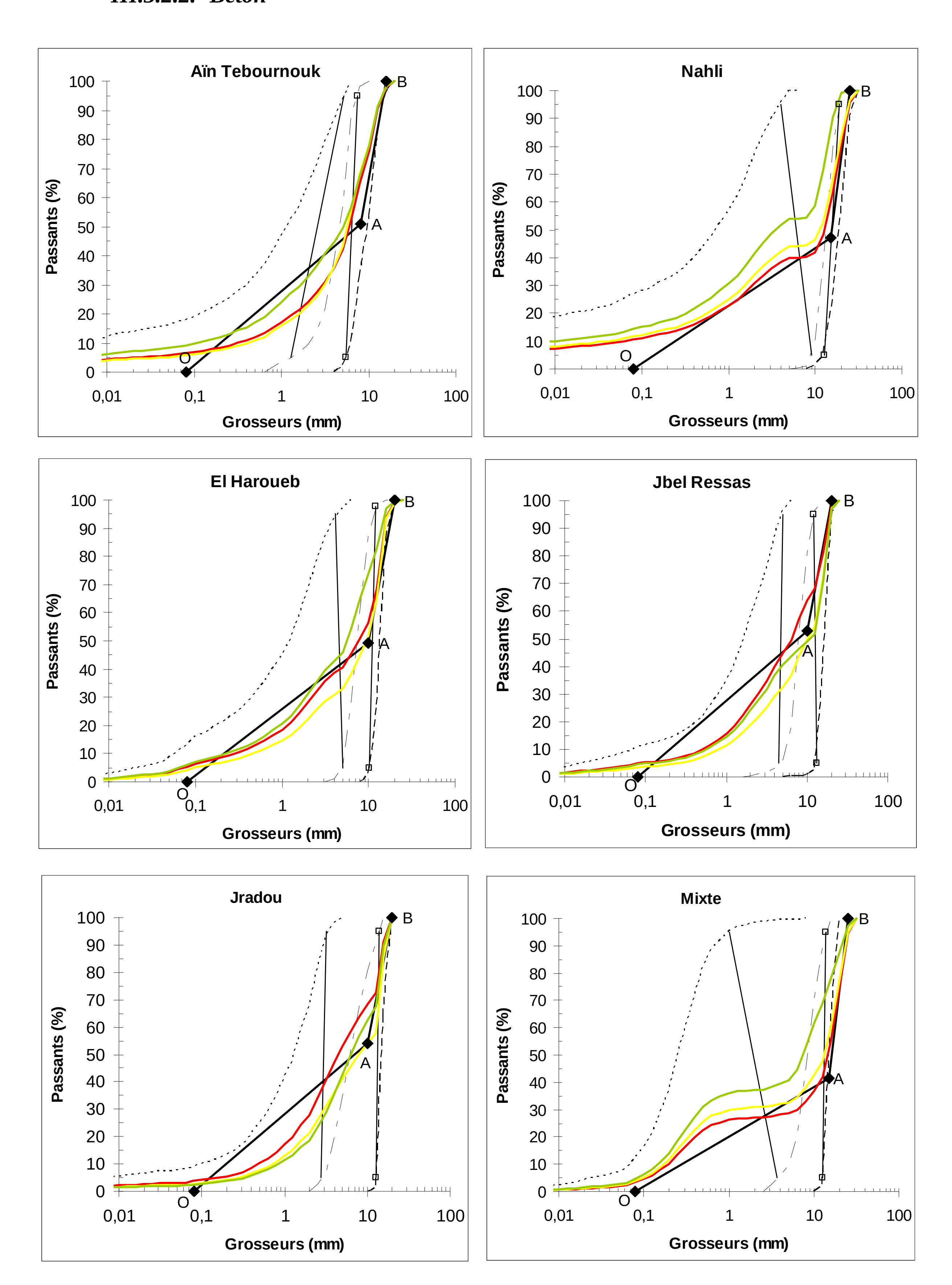
Légende des figures



III.3.2.1. Micro béton



III.3.2.2. Béton



Tab. IV : Proportions volumiques des constituants granulaires des mélanges - Méthode Dreux.

		Aïn Tebournouk		Nahli		El Haoureb		Jbel Ressas		Jradou		Mixte	
Mélange		b	c	b	c	b	c	b	c	b	c	b	c
S	%	43	36	42	40	46	41	50,5	45	45	41	35	27,5
G_1		57	12	58	15	54	16	49,5	23	55	34	65	12,5
G_2			52		45		43		32		25		60
$(G/S)_{Dreux}$		1,33	1,78	1,38	1,50	1,17	1,44	0,98	1,22	1,22	1,44	1,86	2,64
$(G/S)_{réel}$		2,39	2,06	1,62	1,27	2,18	2,06	1,98	2,06	1,85	2,21	1,65	2,19
$(G/S)_{Dreux}/(G/S)_{réel}$		0,56	0,86	0,85	1,18	0,54	0,70	0,49	0,59	0,66	0,65	1,13	1,21

b : micro béton ; c : béton

On constate que les proportions volumiques granulaires obtenues avec la méthode Dreux différent sensiblement de celles données par le CETEC (formules réalisées). A l'exception des mélanges mixtes et du béton Nahli, les formules Dreux sont enrichies en sable et appauvries en gravillons, avec des rapports $(G/S)_{Dreux}/(G/S)_{réel}$ compris entre 0,5 et 0,86. Les rapports $(G/S)_{Dreux}$ ne dépassent pas 1,38 pour les micro bétons, et 1,78 pour les bétons (à l'exception du mélange mixte), alors qu'ils atteignent 2,39 et 2,21 pour les mélanges réalisés. Ces derniers sont donc sousdosées en sable, et donc en fillers, par rapport aux prévisions de la méthode Dreux. Par contre, la méthode prévoit pour le béton de Nahli et les mélanges mixtes moins de sable et plus de gravillons, par rapport aux mélanges réalisés. Les résultats divergent donc sensiblement, par rapport aux formules réalisées. On ne peut toutefois accorder trop de « confiance » aux prévisions de cette méthode, car elle ne s'applique en réalité qu'à des matériaux conventionnels, en particulier si le sable a un taux limité en fillers. D'ailleurs pour cette raison, à priori, que la courbe granulaire de chaque mélange obtenue par la méthode Dreux, représentée en rouge sur la Fig. III-2, ne coïncide pas avec la courbe granulaire de référence OAB. Il peut s'agir aussi du paramètre MF qui sort, dans le cas des sables retenus (Tab. III-III), des limites proposées par la méthode [11]. Cet état de fait traduit les limites de performance de cette méthode…

En conclusion, les mélanges réalisés ont été disproportionnés par rapport aux résultats donnés par la méthode Dreux. Le recours à des formules « prêtes à l'emploi » n'offre donc pas systématiquement une réponse optimale, du moins pour les mélanges réalisés avec les granulats de cette étude… Pour chaque cas, il est donc indispensable de déterminer les combinaisons granulaires optimales à partir des granulats à disposition. Cette précaution n'a pas été respectée dans le cadre du présent travail. La conséquence est que les formules réalisées présentent des rapports G/S très ouverts, selon le type du mélange, par rapport aux valeurs théoriques issues de la méthode Dreux. Comme on le verra plus loin (chapitre V et

VI), ceux-ci ont toutefois permis de tester les limites des modèles de résistance de LCPC [9], qui sont conçus avec des mélanges dont la structure granulaire est optimisée, de préférence.

III.4. Formulation des mélanges selon la méthode LCPC

III.4.1. Introduction

Toute formulation est essentiellement un problème de compacité. Les méthodes existantes reconnaissent implicitement ce principe. Pour le praticien, un béton compact est synonyme d'un béton mécaniquement résistant et durable.

Les méthodes traditionnelles se réfèrent à une granularité de référence propre à chaque béton, pouvant prendre en compte la destination du béton (ferraillage, coffrage, etc.), pour atteindre cet objectif. Certaines de ces méthodes reposent sur la théorie de Caquot [12], qui est la première à avoir considéré les interactions entre grains (effets de paroi et d'interférence) pour calculer la porosité du mélange. La porosité minimale du squelette $(\text{porosité})_{min}$, qui sera comblée par le ciment, l'eau efficace E_{eff} et l'air piégé v, dépend de l'étendue granulaire du squelette, c'est-à-dire du rapport d/D :

$$(\text{porosité})_{min} = (E_{eff} + v)_{min} = \beta \left(\frac{d}{D}\right)^{0,2} \qquad (8)$$

β est relié à la forme des granulats (concassés ou roulés). Il est voisin de 0,4.

D'après cette relation, la porosité minimale d'un empilement optimisé de grains tend vers 0 pour un spectre granulaire d'étendue infinie.

Notons que jusqu'aux années 80, faute de disposer de superplastifiants, il n'était pas possible de disperser les flocs de ciment ou d'additions minérales, tels les fillers. Le seul moyen d'augmenter l'étendue granulaire était alors d'augmenter D. Faury [13], qui a adapté la théorie de Caquot, a proposé une forme simplifiée de la relation (8), valable pour des étendues granulaires réduites correspondant à des bétons courants sans plastifiants :

$$(\text{porosité})_{min} = (E_{eff} + v)_{min} = k \left(\frac{1}{D}\right)^{0,2} \qquad (9)$$

où k est en relation avec la forme des granulats et la consistance des mélanges.

Dans la méthode récente du LCPC, la recherche de la compacité maximale se fait à partir du Modèle d'Empilement Compressible (MEC), en utilisant la granularité du mélange (qui peut être formé d'un nombre quelconque de coupures) et la compacité virtuelle de chaque fraction granulaire qui le constitue, y compris la fraction fine. Ces fractions regroupent les

différentes natures de grains présents. Le concept de courbes granulaires de références est ainsi amélioré, puisque les propriétés réelles de chaque nature de matériau sont prises en compte dans chaque configuration (par le biais des compacités propres mesurées sur les matériaux).

Le MEC a été développé par F. de Larrard et Thierry Sedran [14, 15, 16, 17], qui avaient proposés initialement un premier Modèle Linéaire de Compacité, puis un Modèle de Suspension Solide, moins pertinents que le MEC. Notons que le MEC est disponible en version libre sous le nom de René-LCPC [18].

Sans détailler les fondements de l'approche, rappelons que les principales étapes du calcul de la compacité d'une combinaison granulaire demande la recherche de la compacité virtuelle γ_i de chaque classe i supposée dominante (à partir des proportions y_i, des compacités virtuelles β_i et des effet de paroi b_{ij} et de desserrement a_{ij}, de chaque tranche du mélange), selon la relation suivante :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1}\left[1-\beta_i + b_{ij}\beta_i(1-\frac{1}{\beta_j})\right]y_j - \sum_{j=i+1}^{n}\left[1-a_{ij}(1-\frac{\beta_i}{\beta_j})\right]y_j} \qquad (10)$$

Le calcul de la compacité réelle ϕ du mélange fait appel à la notion d'indice de serrage K, qui est un paramètre décrivant le mode de mise en place. ϕ et K sont reliés par la relation implicite suivante [19] :

$$K = \sum_{i=1}^{n} K_i = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\frac{\phi_i}{\phi_i^*}}{1-\frac{\phi_i}{\phi_i^*}}\right) = \sum_{i=1}^{n}\frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\phi}-\frac{1}{\gamma_i}} \qquad (11)$$

où K_i est l'indice de serrage partiel, qui décrit la contribution de la classe i à l'indice de serrage global K. ϕ_i et ϕ_i^* sont les compacités réelle et maximale de la classe i, compte tenu de la présence des autres classes.

Notons enfin que le modèle MEC constitue aussi le cœur du logiciel BétonlabPro2 [20], qui sert à la formulation des bétons.

III.4.2. Formulation des mélanges sélectionnés avec BétonlabPro2

III.4.2.1. Présentation du logiciel BétonlabPro2

BétonlabPro2 est un logiciel récent de formulation des bétons développé par F. de Larrard et T. Sedran [21]. Il associe plusieurs modèles comportemantiels du béton (calibrés à partir d'une vaste gamme de bétons différents) à la structure granulaire décrite par le MEC. Il permet ainsi de réduire considérablement le nombre d'essais sur bétons, même si des essais de validation sont toujours nécessaires pour s'assurer que les spécifications des cahiers de charges sont bien atteintes. Le logiciel se compose d'une banque de constituants divisée en dossiers où sont stockées toutes les propriétés mesurées sur les granulats, les liants, les additions minérales et les adjuvants. Une fois le jeu de matériaux sélectionné, deux types d'opérations sont possibles.

a. la simulation : le logiciel prédit les propriétés d'un béton défini par l'utilisateur. Ce dernier peut simuler manuellement des gâchées successives en faisant varier les proportions des constituants sélectionnés au préalable afin d'atteindre les propriétés souhaitées. Ce mode permet de visualiser l'influence de chaque constituant sur les différentes propriétés des bétons simulés. Ces propriétés sont nombreuses, elles intéressent le béton à l'état frais (affaissement, seuil de cisaillement, viscosité plastique, ségrégation, etc.) et à l'état durci (résistance à la compression et à la traction entre 1 jour et un an, montée en température, etc.). D'autres propriétés, comme le retrait, le fluage, le module d'élasticité et le coût, sont aussi simulées.
b. l'optimisation : c'est en fait la démarche inverse. Elle permet de trouver, à partir d'un cahier des charges cohérent, une formule optimisée. Pour cela, différentes contraintes peuvent être fixées (le coût unitaire est souvent un critère prépondérant). Le logiciel détermine alors la formule qui répond au mieux aux contraintes établies.

Une mise à jour de ce logiciel (BétonlabPro3) est annoncée pour courant 2007. Cette nouvelle version traite des bétons à air entrainé, d'usage de plus en plus courant. Elle permet aussi d'incorporer les laitiers moulus de haut-fourneau, complétant ainsi la gamme des additions minérales prises en compte par BétonlabPro2 [22].

Notons enfin qu'en Tunisie, jusqu'à fin 2006, à notre connaissance, aucun industriel du béton, ni aucun établissement d'enseignement supérieur n'avaient acquis ce logiciel, ni

même la version antérieure Bétonlab [20]. La raison est toute simple : « le logiciel est compliqué pour s'en servir ! ». Récemment, en 2007, le Laboratoire de Génie Civil LGC de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis ENIT s'est procuré BetonlabPro2.

III.4.2.2. Application aux mélanges sélectionnés

Les options de calcul offertes par ce logiciel ont permis de déterminer les proportions volumiques qui conduisent à la compacité maximale des mélanges granulaires des micro bétons et des bétons réalisés avec les matériaux sélectionnés. L'option d'optimisation (§ 4.2.1.a) a été utilisée. La technique adoptée s'inspire de la démarche « Baron-Lesage » [23]. Elle consiste à laisser le logiciel chercher les proportions qui confèrent au mélange sa plus forte compacité, en lui demandant de minimiser l'indice de serrage lorsque les quantités de ciment et d'eau sont fixées. Pour ces deux paramètres, les valeurs des dosages effectivement mis en œuvre (voir Tab. III-II) ont été imposés. Les calculs ont été faits en considérant tout d'abord les sables bruts S (c'est-à-dire avec leur fraction fine). On obtient les résultats indiqués « formule 1 » dans les Tab. III-V. Ils ont été refaits ensuite, en considérant les sables dépourvus des fillers (« formule 2 sans fillers » du même tableau). Dans ce cas, les granulométries des sables ont été recomposées sans leur fraction fine (sables S_b), et elles ont été entrées comme nouveaux constituants dans la banque de données. Les proportions de S_b peuvent être déduites de S (*uniquement les grains de diamètres supérieurs à 80 µm*), en %, par la relation suivante:

$$S_b = \frac{(S-\tau)}{(100-\tau)}\ 100 \text{ , en } \% \tag{12}$$

où τ est le taux des fillers du sable, en %. S_a est déterminée à partir de la relation suivante (*les grains de* S *concernés sont ceux de diamètres inférieurs à 80 µm*) :

$$S_a = \frac{100}{\tau}\ S \text{ , en } \% \tag{13}$$

En gardant les proportions des mélanges sans fillers, les formules ont été recalculées avec les sables complets S («formules 2 avec fillers»). On trouve ainsi les proportions des constituants comme si les fillers du sable étaient associées à la pâte. Pour le calcul, la proportion de sable S est déduite de S_b et du taux de fillers (relation (12), valeurs en italique souligné dans les colonnes « sans fillers »), puis les proportions des deux ou trois granulats ont été ramenées à 100 % (Tab. III-V). Les courbes granulaires des mélanges obtenues par le MEC (« formule 2 avec fillers ») sont présentées en vert sur la Fig. III-2. Elles se confondent,

approximativement, avec celles obtenues par la méthode Dreux pour les micro bétons de El Haoureb et de Jbel Ressas. Les rapports gravillons/sable (G/S) des distributions granulaires du CETEC, de Dreux et du MEC (BétonlabPro2) complètent le Tab. III-V ($G=G_1+G_2$).

Tab. III-V : Proportions volumiques des mélanges optimums – Logiciel BétonlabPro2.

Granulat		Aïn Tebournouk						Nahli					
Mélange		b			c			b			c		
Formule		1	2		1	2		1	2		1	2	
			sans fillers	avec fillers		sans fillers	avec fillers		sans fillers	avec fillers		sans fillers	avec fillers
Sable S_b	%		58			46			46			46	
S	%	89,1	*70,6*	62,7	62,4	*56*	51,4	34,3	*63*	53,9	61,3	*63*	53,9
G_1	%	10,9	42	37,3	0	0	0	65,7	54	46,1	0	54	46,1
G_2	%	0	0	0	37,6	53	48,6	0	0	0	38,7	0	0
τ	%	17,8						27					
$(G/S)_{BétonlabPro2}$		0,12		0,60	0,60		0,95	1,92		0,86	0,63		0,86
$(G/S)_{réel}$		2,39		2,39	2,06		2,06	1,62		1,62	1,27		1,27
$(G/S)_{Dreux}$		1,33		1,33	1,78		1,78	1,38		1,38	1,5		1,5
$(G/S)_{BétonlabPro2}$ / $(G/S)_{réel}$		0,05		0,25	0,29		0,46	1,18		0,53	0,50		0,67
$(G/S)_{BétonlabPro2}$ / $(G/S)_{Dreux}$		0,09		0,45	0,34		0,53	1,39		0,62	0,42		0,57

Granulat		El Haoureb						Jbel Ressas					
Mélange		b			c			b			c		
Formule		1	2		1	2		1	2		1	2	
			sans fillers	avec fillers		sans fillers	avec fillers		sans fillers	avec fillers		sans fillers	avec fillers
Sable S_b	%		42			42			46,5			39	
S	%	39,7	*48,4*	45,5	34,6	*48,4*	45,5	49,9	*52,2*	49,4	46,5	*43,8*	41,8
G_1	%	60,4	58,0	54,5	26,8	33,5	31,5	50,1	53,5	50,6	7,8	9	8,6
G_2	%	0	0	0	38,6	24,5	23	0	0	0	45,7	52	49,6
τ	%	13,2						11					
$(G/S)_{BétonlabPro2}$		1,52		1,20	1,89		1,20	1,00		1,02	1,15		1,39
$(G/S)_{réel}$		2,18		2,18	2,06		2,06	1,98		1,98	2,06		2,06
$(G/S)_{Dreux}$		1,17		1,17	1,44		1,44	0,98		0,98	1,22		1,22
$(G/S)_{BétonlabPro2}$ / $(G/S)_{réel}$		0,70		0,55	0,92		0,58	0,51		0,52	0,56		0,68
$(G/S)_{BétonlabPro2}$ / $(G/S)_{Dreux}$		1,30		1,02	1,31		0,83	1,02		1,04	0,94		1,14

Granulat		Jradou						Mixte					
Mélange		b			c			b			c		
Formule		1	2		1	2		1	2		1	2	
			sans fillers	avec fillers		sans fillers	avec fillers		sans fillers	avec fillers		sans fillers	avec fillers
Sable S_b	%		25			25,5			37,8			34,8	
S	%	23,8	*27,5*	26,9	48,3	*28,1*	27,4	41,2	*43,0*	40,8	37,3	*39,5*	37,8
G_1	%	76,2	75	73,1	44	44,5	43,4	58,8	62,2	59,2	35,2	34,8	33,2
G_2	%	0	0	0	7,7	30	29,2	0	0	0	27,5	30,4	29
τ	%	9,2						12					
$(G/S)_{BétonlabPro2}$		3,21		2,72	1,07		2,65	1,43		1,45	1,68		1,65
$(G/S)_{réel}$		1,85		1,85	2,21		2,21	1,65		1,65	2,19		2,19
$(G/S)_{Dreux}$		1,22		1,22	1,44		1,44	1,86		1,86	2,64		2,64
$(G/S)_{BétonlabPro2}$ / $(G/S)_{réel}$		1,73		1,47	0,49		1,20	0,86		0,88	0,77		0,75
$(G/S)_{BétonlabPro2}$ / $(G/S)_{Dreux}$		2,63		2,23	0,74		1,84	0,77		0,78	0,64		0,62

b : micro béton ; c : béton.

Les principaux constats suivants peuvent être faits :

- les proportions des constituants S, G_1 et G_2 données par BetonlabPro2 sont sensiblement différentes entre formule 1 et formule 2. Elles varient en fonction du taux de fillers présent dans ces mélanges. Les différences sont maximales pour le béton Nahli, dont le sable est riche en fillers. Pour ce mélange, la formule 1 optimisée est obtenue sans la fraction G_1, alors que pour la formule 2, elle est donnée sans la fraction G_2. Cet exemple montre bien l'effet important du taux fillers sur la structure granulaire des mélanges ;
- pour la formule 1 des bétons de Aïn Tebournouk, dont le sable est (aussi) riche en fillers, on retrouve le même comportement que pour Nahli (formule 1), c'est-à-dire le rejet de la fraction intermédiaire G_1, qui a manifestement un effet décompactant lorsque le sable est introduit en proportion supérieure à 61 % ;
- la plupart des mélanges proposés par BetonlabPro2 sont plus riches en sable que dans les mélanges réalisés, dans des rapports compris entre 1,2 et 2. Certains bétons (Aïn Tebournouk, Jbel Ressas) sont appauvris en gravillon G_1, alors que les autres sont appauvris en gravillon G_2. Les rapports $(G/S)_{BétonlabPro2}/(G/S)_{réel}$ varient dans des proportions fortes et alternées ;
- la plupart des mélanges proposés par BetonlabPro2 sont plus riches en sable que ceux proposés par la méthode Dreux (excepté pour Jradou), dans des rapports compris entre 1 et 1,4. Les proportions de gravillon G_1 et G_2 proposées par la méthode Dreux sont sensiblement celles des bétons réalisés ; les constats précédents s'appliquent donc encore ici (à l'exception des bétons de Jbel Ressas et de Jradou).

Il résulte finalement que lorsque les mélanges contiennent un taux plutôt élevé de fillers, les méthodes de formulation traditionnelles ne sont plus capables de désigner le mélange qui conduit à la plus forte compacité…

III.4.3. Compacité des mélanges - Logiciel René-LCPC

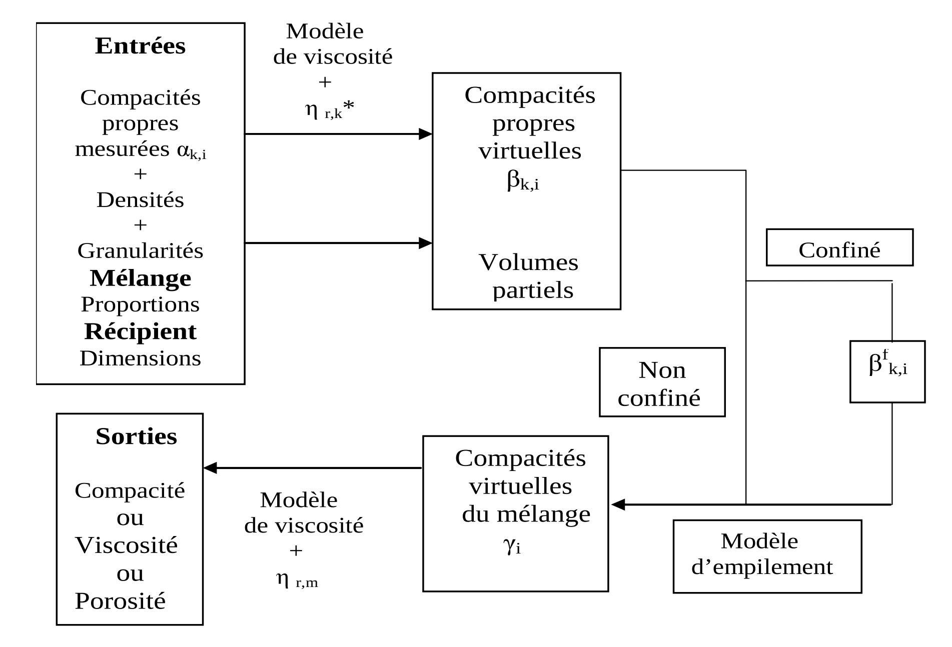
BetonlabPro2 ne donne pas directement la compacité de l'empilement granulaire pour un indice de serrage fixé (K=9, par exemple). C'est la raison pour laquelle les compacités des différentes combinaisons granulaires du CETEC, de Dreux et de BetonlabPro2 ont été calculées avec le logiciel René-LCPC [18]. Cet outil informatique, qui correspond au MEC, permet par simulation, à partir des propriétés des constituants (masse volumique réelle, granularité, compacité mesurée de l'empilement, etc.) et de leurs proportions *massiques,* de déterminer directement la porosité du squelette granulaire pour un indice de serrage donné. Ainsi, par itération, le logiciel permet de trouver le mélange le plus compact (le moins poreux). Pour une combinaison de deux granulats g1 et g2, la solution correspond à l'optima d'une courbe ϕ=f (g1/g2). Par contre, pour un nombre de granulats supérieur, les proportions optimales ne peuvent être trouvées qu'à l'issu d'un nombre croissant d'itérations résultant de toutes les combinaisons possibles, en principe. C'est la raison pour laquelle ces proportions ont été recherchées avec le modèle d'optimisation de BetonlabPro2 (voir précédemment), et les porosités/compacités avec René-LCPC…

Notons enfin que malgré la possibilité de télécharger gratuitement le logiciel René-LCPC, aucun établissement universitaire ou laboratoire tunisien ne l'utilise. C'est au cours de ces travaux de thèse que ce logiciel a pu être utilisé pour la première fois en Tunisie !

III.4.3.1. Présentation du logiciel René-LCPC

Le schéma de fonctionnement de René-LCPC, tiré de [18], est rappelé sur la Fig. III-3. Ce logiciel est accompagné par une notice d'utilisation décrivant notamment les protocoles expérimentaux pour mesurer les compacités de chaque constituant [24].

Fig. III-3 : Schéma de fonctionnement de René-LCPC [18].



où $\eta_{r,k}*$ est la viscosité relative de référence du mélange de k constituants
$\eta_{r,m}$ est la viscosité relative du mélange de m constituants
$\beta^f_{k,i}$ est la compacité propre de la classe des grains de taille d_i dans un volume fini de k constituants.

NB : ce schéma correspond à la version antérieure de René-LCPC, qui mettait en œuvre le modèle de suspension solide. La notion de viscosité relative est remplacée dans le MEC par celle de l'indice de serrage K.

III.4.3.2. Calcul de compacité des mélanges

Les proportions massiques des constituants de chaque mélange ont été déduites des proportions volumiques. Le passage se fait à l'aide de la masse volumique réelle. Les masses obtenues ont ensuite été relativisées à 100 %. Les pourcentages correspondant pour S_b, G_1 et G_2 sont donnés dans le Tab. III-VI, pour les trois méthodes de formulation. Les caractéristiques des constituants ont été entrées dans le logiciel. Les données sont disponibles au chapitre II.3.1. Le calcul de la porosité granulaire n* des mélanges sans fillers a été effectué en considérant un indice de serrage K égal à 9, qui correspond au serrage d'un empilement sec bloqué (d'où l'astérisque *). La compacité granulaire g* est alors déduite de n* selon la relation (14). Les résultats obtenus complètent le Tab. III-VI.

$$g^* = 1 - n^* \qquad (14)$$

Tab. III-VI : Proportions massiques des constituants dans chaque mélange, porosité et compacité des mélanges.

Formules			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Granulat		Aïn Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou			Mixtes		
	Mélange		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Réalisées (CETEC)	S_b	%	100	25,59	28,60	100	31,25	36,52	100	28,54	29,59	100	31,13	30,16	100	35,15	30,76	100	36,32	29,1
	G_1		0	74,41	21,28	0	68,75	20,04	0	71,46	20,54	0	68,87	21,27	0	64,85	27,64	0	63,68	14,99
	G_2		0	0	50,13	0	0	43,43	0	0	49,88	0	0	48,57	0	0	41,61	0	0	55,91
	n* (K=9)		0,299	0,316	0,274	0,311	0,264	0,235	0,348	0,305	0,272	0,327	0,291	0,248	0,357	0,268	0,246	0,311	0,187	0,197
	g*		0,701	0,684	0,726	0,689	0,736	0,765	0,652	0,695	0,728	0,673	0,709	0,752	0,643	0,732	0,754	0,689	0,813	0,803
Dreux-Gorisse	S_b	%	100	38,28	31,69	100	34,75	32,70	100	42,63	37,53	100	47,68	42,12	100	45,05	40,65	100	33,71	25,36
	G_1		0	61,72	12,85	0	65,25	16,67	0	57,37	16,79	0	52,32	24,10	0	54,95	33,64	0	66,29	12,21
	G_2		0	0	55,47	0	0,00	50,63	0	0,00	45,68	0	0,00	33,78	0	0	25,71	0	0	62,44
	n* (K=9)		0,299	0,303	0,268	0,311	0,251	0,247	0,348	0,286	0,26	0,327	0,278	0,248	0,357	0,273	0,254	0,311	0,191	0,223
	g*		0,701	0,697	0,732	0,689	0,749	0,753	0,652	0,713	0,73	0,673	0,72	0,752	0,643	0,727	0,746	0,689	0,809	0,777
BétonlabPro2	S_b	%	100	58,00	46,56	100	46,19	46,19	100	42,12	42,00	100	46,59	38,94	100	26,90	27,11	100	39,47	35,72
	G_1		0	42,00	0	0	53,81	53,81	0	57,88	33,33	0	53,41	8,95	0	73,10	42,86	0	60,53	33,29
	G_2		0	0	53,44	0	0	0,00	0	0	24,68	0	0	52,11	0	0	30,03	0	0	30,99
	n* (K=9)		0,299	0,292	0,25	0,311	0,233	0,233	0,348	0,287	0,268	0,327	0,278	0,238	0,357	0,268	0,246	0,311	0,187	0,177
	g_{opt} *		0,701	0,708	0,75	0,689	0,767	0,767	0,652	0,713	0,732	0,673	0,722	0,762	0,643	0,732	0,754	0,689	0,813	0,823

a : mortier ; b : micro béton ; c : béton ; g_{opt} *: compacité du mélange optimum

La lecture de ce tableau appelle les observations suivantes :

- pour n'importe quel mélange granulaire réalisé avec des granulats de la même carrière, la compacité est une fonction croissante de l'étendue granulaire. Plus le spectre granulaire est large (mortier, micro béton, béton), plus la compacité est élevée. On rejoint ainsi la théorie de Caquot [12] ;
- les proportions granulaires du MEC sont celles qui conduisent à la compacité la plus forte, ce qui suppose que la consistance des mélanges réalisés aurait pu être atteinte avec une quantité d'eau efficace moindre, si leurs proportions granulaires avaient été optimisée ;
- les compacités déduites des proportions données par la méthode Dreux s'intercalent entre celles des formules du CETEC et celles du MEC. Elles sont généralement plus proches de celles du MEC ;
- la compacité des bétons réalisés avec les granulats de Aïn Tebournouk, de El Haoureb, de Jbel Ressas et de Jradou est proche de celles trouvée par le MEC, bien que leur distribution granulaire soit légèrement sous-dosée en éléments fins, par rapport au MEC.

III.4.4. Indices de serrage des mélanges réalisés (logiciel Compac)

Comme chaque mélange est caractérisé de façon univoque par son ou ses indices de serrage (global ou partiels), on a cherché à déterminer ces paramètres pour les mélanges réalisés. Plutôt que d'utiliser René-LCPC, l'outil informatique choisi est ici le logiciel Compac [25], car il permet en outre de calculer plusieurs autres propriétés prévisionnelles des mélanges hydrauliques frais. Compac est en fait une réécriture de BetonlabPro2, non commercialisée, mais plus « ouverte » que le logiciel commercial où il n'est pas possible d'amender les algorithmes, comme cela est souvent souhaitable dans le cadre d'une recherche, par exemple. Comme BetonlabPro2, il permet de connaître l'indice de serrage K du mélange, les indices partiels du ciment K_c et de la fraction gravillon K_g. Il permet en plus de connaître celui de la fraction fine (0/1) $K_{0/1}$. Chaque indice partiel décrit le niveau de serrage de la tranche granulaire considérée dans le mélange complet. Les résultats sont donnés dans le Tab. III-VII, pour l'ensemble des mélanges à l'exception des mixtes. D'après F. de Larrard [9], le paramètre K_c est pris comme paramètre contrôlant le ressuage des mélanges frais. Dans les travaux de A. Lecomte et al. [26], ce paramètre a été substitué par l'indice $K_{0/1}$ qui prend en compte aussi la fraction filler dans le phénomène de ressuage. Les expériences correspondantes ont été réalisées sur des bétons ayant des taux de fillers variables. Elles ont montré que les bétons riches en fillers ressuent beaucoup moins que ceux pauvres en fillers [26].

Notons que d'autres propriétés sont décrites par ce logiciel, comme le potentiel de ségrégation I_s. L'intérêt de ce paramètre est qu'il permet de déceler les mélanges granulaires propices à la ségrégation. Plus sa valeur est faible, moins le mélange est prédisposé à ségréger. Sa valeur est contrôlée par le plus petit volume relatif partiel des classes agrégées (regroupement de quatre classes élémentaires d/D) du mélange [9]. Sa valeur est liée à l'indice de serrage par la relation suivante [9] :

$$I_S = \underset{1\le i\le n}{\mathrm{Max}}\ I_{S_i} = \underset{1\le i\le n}{\mathrm{Max}}\left(1-\frac{\phi_i}{\phi_i^*}\right) = 1-\underset{1\le i\le n}{\mathrm{Min}}\left(\frac{K_i}{1+K_i}\right) \qquad (15)$$

où I_{S_i} est le potentiel de ségrégation de la classe agrégée i dans le mélange, les paramètres ϕ_i, ϕ_i^* et K_i ont été définies précédemment (relation 11).

D'après cette formule, l'indice de ségrégation I_S est minimisé si les valeurs de K_i sont plus fortes, c'est-à-dire si la quantité $\underset{1\leq i\leq n}{\mathrm{Min}}\left(\frac{K_i}{1+K_i}\right)$ est maximisée. Les valeurs de I_s pour les différents mélanges réalisés sont données dans le Tab. III-VII.

Tab. III-VII : Indices de serrage et potentiel de ségrégation des mélanges réalisés.

	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Granulat		Aïn Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou		
Mélange		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Indice serrage	K	4,217	5,914	6,238	3,866	6,219	6,598	5,978	7,650	7,225	5,666	6,857	7,482	4,343	5,365	5,954
	K_c	2,437	1,776	1,987	2,585	2,580	2,852	3,041	2,058	2,200	2,859	1,799	2,205	1,979	1,517	1,602
	K_s	1,685	2,987	2,022	1,281	1,236	1,622	2,880	1,988	1,803	2,734	1,961	2,026	2,363	2,659	2,153
	K_g	0	1,151	2,229	0	2,403	2,124	0	3,604	3,222	0	3,096	3,250	0	1,189	2,200
	$K_{0/1}$	3,262	2,341	2,577	3,276	3,198	3,679	4,511	2,746	2,951	3,966	2,342	2,860	3,086	2,202	2,292
I_S		0,83	0,90	0,87	0,90	0,88	0,82	0,89	0,86	0,84	0,89	0,89	0,91	0,88	0,88	0,91
G/G+S		0	0,70	0,67	0	0,62	0,56	0	0,69	0,67	0	0,66	0,67	0	0,63	0,67

Trois constats peuvent être faits suite à la lecture de ce tableau :

- Premier constat : il concerne l'indice de serrage K du mélange complet. Pour les mélanges hydrauliques réalisés avec les granulats provenant d'une même carrière, plus le diamètre D augmente, plus l'indice K augmente, à consistance comparable (tous les mélanges avaient globalement le même affaissement). L'indice K du béton est plus élevé que celui du micro béton, lui-même supérieur à celui du mortier ;
- Deuxième constat : il concerne l'indice de serrage $K_{0/1}$ de la fraction fine. D'après la Fig. III-4, on remarque que lorsque le rapport fi/g du mélange augmente, la valeur $K_{0/1}$ augmente aussi et par suite le risque de ressuage diminue (d'après la relation (15)). Le lissage est médiocre, mais la tendance est vérifiée. On retrouve ainsi le même constat que celui présenté dans la référence [26]. Les valeurs de fi/g, données dans le Tab. III-II, constituent donc aussi un indicateur pertinent de la prédisposition au ressuage ;
- Troisième constat : il concerne l'indice de ségrégation I_S. D'après la Fig. III-5, ce dernier augmente lorsque la proportion volumique de gravillons dans le mélange (G/G+S) augmente aussi. Toutefois, compte tenu de la valeur de cet indice, les mélanges ont tous une certaine tendance à la ségrégation.

Fig. III-4 : Évolution de l'indice de serrage $K_{0/1}$ de la fraction fine en fonction des taux en fillers fi/g dans le mélange.

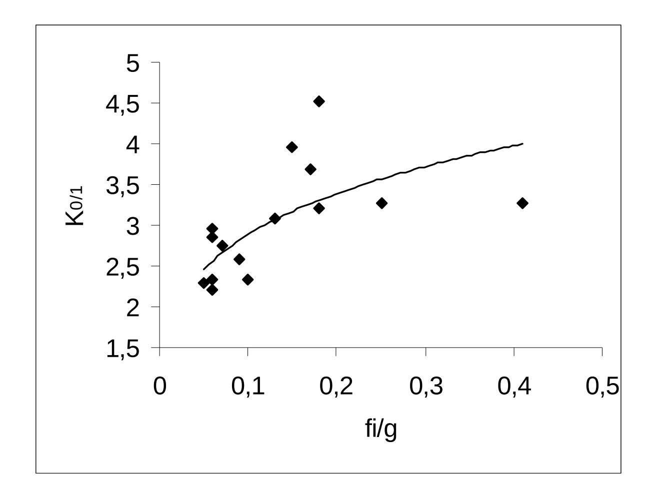
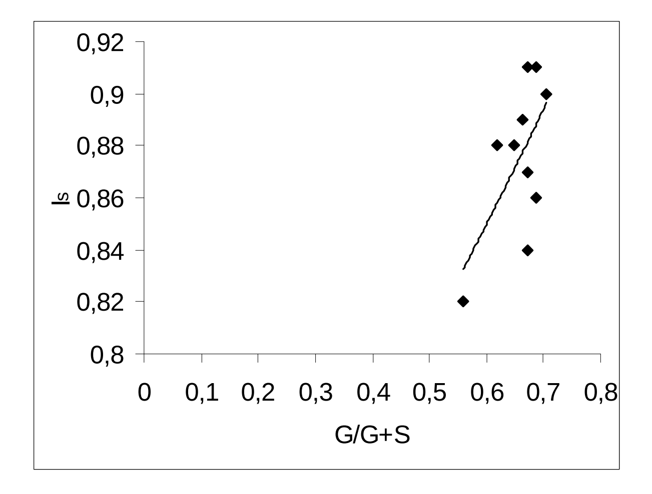


Fig. III-5 : Évolution du potentiel de ségrégation I_S en fonction des proportions volumiques de gravillons G/G+S.



III.5. Conclusion

Les dix huit formules de mortiers, de micro bétons et de bétons proposées par le CETEC et réalisées avec les matériaux retenus, utilisés tels quels (pas de lavage des granulats), montrent tout d'abord qu'elles ne correspondent pas à des formules dont le squelette granulaire est réellement optimisé. L'étude de leur compacité granulaire (mélange sans ciment, indice de serrage K=9) a révélé en effet que les mélanges étaient moins compacts que ceux trouvés avec BetonlabPro2, et ceux aussi donnés par la méthode Dreux. Il apparaît donc que le recours à des formules « prêtes à l'emploi » s'est révélée être une approche « hasardeuse ». Toutefois, les bétons réalisés avec les granulats de Aïn Tebournouk, de El Haoureb, de Jbel Ressas et de Jradou ont des compacités granulaires proches de la compacité optimale. Ces mélanges serviront donc en priorité de « référence » dans cette étude.

Les formules réalisées présentent des rapports G/S et fi/g très ouverts, selon le type de mélange et le taux de fillers des sables utilisés (carrières), par rapport aux formules optimisées. Cet ventail est finalement un atout pour pouvoir étudier le rôle de cette fraction fine sur le comportement mécanique des mélanges.

Des difficultés de mise en œuvre ont été rencontrées pour certains mélanges (Nahli, micro béton et béton du mélange Mixte) du fait, soit du taux élevé des fillers dans le mélange, soit de leur nature argileuse. Des ajouts d'eau lors du malaxage ont été nécessaires pour obtenir la maniabilité de référence. Ni réelle ségrégation, ni ressuage n'ont toutefois été observés sur ces mélanges.

La connaissance de la résistance mécanique de ces mélanges au squelette granulaire non optimisé va permettre de tester la pertinence des modèles associés au logiciel BetonlabPro2 du LCPC. On peut s'attendre légitimement à une dérive de ces modèles, pour cause d'une plus forte teneur en fillers que celle des mélanges qui ont servi à calibrer ces algorithmes, et d'une structure granulaire non optimisée en général. Les chapitres V et VI traitent de ces problématiques. Le chapitre IV présente les performances mécaniques mesurées sur les différents mélanges.

III.6. Références bibliographiques

[1] Dreux G., 1970, "Guide pratique du béton", Collection de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.

[2] Baron J., Ollivier J.P., 1996, "Les bétons – Bases et données pour leur formulation", Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles.

[3] Norme N FP 18.305, 1996, "Béton – Béton prêt à l'emploi", Août, AFNOR.

[4] Norme N F EN 12350-2, 1999, "Essai pour béton frais – Partie 2 : essai d'affaissement", Décembre, AFNOR.

[5] Norme N FP 18.551, 1990, "Granulats – Prélèvement de matériaux sur stocks", AFNOR.

[6] Norme N FP 18.404, 1981, "Béton – Essais d'études, de convenance et de contrôle – Confection et conservation des éprouvettes", AFNOR.

[7] Norme N FP 18.422, 1981, "Bétons – Mise en place par aiguille vibrante", AFNOR.

[8] Mensi R., 2000, "Recueil d'essais sur les matériaux de construction", Document de la bibliothèque de l'École Nationale d'Ingénieures de Tunis, Réf. 429 PE.

[9] de Larrard F., traduit de l'anglais par A. Lecomte, 2000, "Structures granulaires et formulation des bétons". Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° OA 34, 414 pages, Avril.

[10] Lecomte A., 1998, "Ajustement des méthodes de formulation de béton au m^3 en tenant compte du volume réel", Annales du Bâtiment et des Travaux Publics N°5, Octobre-Novembre, pp. 13-26.

[11] Dreux G., Festa J., 1995, "Nouveau guide du béton et de ses constituants", Huitième édition, Eyrolles.

[12] Caquot A., 1937, "Le rôle des matériaux dans le béton", In : Mémoires de la société des Ingénieurs Civils de France, Juillet-Août, pp.562-582.

[13] Faury J., 1953, "Le béton – Influence de ses constituants inertes – Règles à adopter pour sa meilleure composition – Sa confection et son transport sur les chantiers", Dunod, Ed., Paris, Troisième édition, pp. 66-67.

[14] de Larrard F., 1988, "Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances", Rapport de recherché de Laboratoire des Ponts et Chaussées, 149, Mars, 342 pages.

[15] de Larrard F., Sedran T., Angot D., 1994a, "Prévision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. I : Fondements théoriques et étalonnage

du modèle", Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 194, Novembre-Décembre, pp.77-86.

[16] de Larrard F., Sedran T., Angot D., 1994b, "Prévision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. II : Validations. Cas des mélanges confinés", Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 194, Novembre-Décembre, pp.77-86.

[17] de Larrard F., 1999, "Concrete mixture-proportioning, A scientific approach", Modern Concrete Technology, 9, S. Mindess & A. Bentur, Editors E & FN SPON, London.

[18] Sedran T., de Larrard F., 1994, "RENE-LCPC – Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux du génie civil", Note technique, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 194, Novembre-Décembre.

[19] de Larrard F., Ferraris C. F., 1998, "Rhéologie du béton frais remanié II – Relations entre composition et paramètres rhéologiques", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 214, Mars-Avril, Réf. 4177, pp. 69-79

[20] de Larrard F., Fau D., 1996," Bétonlab – Logiciel d'aide à la formulation des bétons", Version 3.5, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[21] Sedran T., de Larrard F., 2000,"BétonlabPro2 - Logiciel de formulation des bétons", Version 2.0 exécutable sous Windows 95 et versions ultérieures, Logiciel et notice, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Juillet.

[22] GEODIF, 2007,"Catalogue 2007 – Ouvrages et Logiciels", Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Distribution SODIS, p. 33.

[23] Baron J., Lesage R., 1969, "Compacité et maniabilité des bétons hydrauliques", Rapport de recherche du Laboratoire des Ponts et Chaussées, N° 3, Août.

[24] de Larrard F., Sedran T., 2000, "Manuel d'utilisation de René-LCPC – Version 6.1d. Logiciel d'optimisation granulaire", Septembre.

[25] Lecomte A., 2006, "Logiciel Compac", Aspect théorique, Notices d'utilisation, Laboratoire de Chimie du Solide Minéral – Université Henri Poincaré, Nancy.

[26] Lecomte A., de Larrard F., Mechling J.M., 2001, "Résistance à la compression de bétons hydraulique au squelette granulaire non optimisé", Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 234, Septembre-Octobre, Réf. 4378, pp. 89-105.

Chapitre IV

Propriétés mécaniques des bétons calcaires - Modélisations

IV.1. Introduction

Les résistances mécaniques et les modules d'élasticité des différents mélanges réalisés ont été mesurés entre un jour et un an au laboratoire CETEC, selon les protocoles normalisés en vigueur. On présente dans ce chapitre les résultats de cette campagne d'essais, qui a concerné, rappelons-le, quelques 720 éprouvettes 16×32. Cinq éprouvettes étaient disponibles pour chaque type de composite (mortier, micro béton, béton), pour chaque carrière, et pour chaque échéance. Pour un lot, une première éprouvette a été testée en compression, pour avoir une première valeur de résistance. Deux autres éprouvettes ont alors servi au mesure du module d'élasticité (chargement au tiers de la résistance), avant d'être à leur tour testées en compression. La résistance à la traction a été mesurée sur les deux dernières éprouvettes. Les valeurs retenues correspondent en général à la moyenne algébrique des résultats, dans l'hypothèse de valeurs centrées. Si les résultats étaient (trop) dispersés (traction notamment), les valeurs retenues résultent d'une analyse de la cohérence globale des données, soit 24 valeurs pour la compression, et 16 valeurs pour le module et la traction.

La première partie de ce chapitre concerne la résistance à la compression. On présente tout d'abord le modèle de F. de Larrard (LCPC) de prédiction de cette propriété, puis les résultats des essais. Le traitement de la montée de la résistance au cours du temps a permis de mettre en évidence l'influence des propriétés des constituants sur cette résistance. La deuxième et troisième partie de ce chapitre concernent la résistance à la traction et le module d'élasticité. Elles sont présentées de la même façon que précédemment.

Pour les trois propriétés étudiées, les évolutions dans le temps sont présentées sur une échelle cartésienne et non sur une échelle semi-logarithmique, comme c'est souvent le cas dans la littérature. Ce choix permet aussi d'expliquer certains aspects physiques liés aux propriétés des constituants. Dans les deux cas, on aurait abouti aux mêmes interprétations.

Notons enfin qu'il ne s'agit pas, dans ce chapitre, de statuer sur la pertinence des modèles du LCPC vis-à-vis des mélanges hydrauliques calcaires réalisés (cet aspect est traité dans les chapitres V et VI), mais plutôt de vérifier que les propriétés des constituants interviennent de manière explicite sur l'évolution dans le temps de la résistance mécanique des bétons.

IV.2. Résistance à la compression

IV.2.1. Modèles

De nombreux chercheurs se sont intéressés aux relations entre composition et résistance à la compression des bétons. Plusieurs relations ont été proposées. Historiquement, c'est R. Féret [1] qui présenta le premier modèle de résistance. Il consiste à calculer la résistance du béton à partir de celle de la pâte et d'un coefficient qualitatif K_f dépendant principalement du granulat. La résistance de la pâte dépend de la résistance normale du ciment σc et de sa concentration, élevée au carré. D'après les travaux de Baron et Ollivier [2], la formule proposée donne généralement des valeurs satisfaisantes dans les échéances comprises entre sept jours et trois mois pour des bétons courants de rapport *massique* E/C compris dans l'intervalle [0,4 ; 0,7]. Sa validité pour des bétons plus performants à base de granulats résistants a été vérifiée par F. de Larrard [3]. Toutefois, cette relation ne prend pas en compte d'une manière précise et explicite l'effet réel du granulat (ni sa nature minéralogique, ni sa résistance mécanique). Son expression est donnée par la relation suivante :

$$fc(t) = K_f \;\sigma c(t) \left(\frac{c}{c+e+a} \right)^2 \qquad (1)$$

où c, e et a sont respectivement les dosages volumiques du ciment, d'eau et d'air

Une approximation linéaire de la formule de Féret a été proposée ultérieurement par Bolomey [4]. Elle permet d'estimer la résistance à la compression selon la relation suivante :

$$fc(t) = K_b \;\sigma c(t) \left(\frac{C}{E+V_a} - 0,5 \right) \qquad (2)$$

La participation des granulats est prise en compte par le coefficient granulaire qualitatif K_b. Sa valeur est fixée dans un tableau à partir de la « qualité » du granulat. La participation du ciment est prise en compte par $\sigma c(t)$ et par le dosage massique C. E est le dosage en eau efficace et V_a est le volume d'air exprimé en masse d'eau occupant le même volume (pour être homogène avec E).

On notera que ces deux relations ne prennent pas en compte le rôle des additions minérales « liantes » utilisées dans les bétons à hautes performances, ni celui des fillers calcaires pouvant avoir aussi certains effets (accélérateur de montée en résistance, par exemple). De même, le rôle complexe du granulat dans le composite n'est pas exprimé de façon rationnelle. Ses propriétés réelles (résistance mécanique, adhérence avec la pâte de ciment, etc.) n'interviennent pas directement dans le calcul de la résistance fc du composite.

Récemment, un modèle plus complet a été proposé par F. de Larrard [5], dans lequel le béton est assimilé à un matériau composite formé d'une phase rigide dure et inerte (le granulat) suspendue dans une matrice liante (la pâte de ciment), l'ensemble étant considéré comme homogène. La résistance prévisionnelle à la compression du béton fc(t) à différentes échéances (de 1 jour à 1 an) est calculée par étapes. Les détails de calcul et les fondements des relations sont présentés dans la référence [6] et, dans une certaine mesure, dans le chapitre V. Nous présentons ci-après les relations pour le calcul de la résistance prévisionnelle à la compression sous sa forme complète, ainsi que les relations y afférant :

$$fc(t) = \frac{p\ fc_m(t)}{q\ fc_m(t)\ +\ 1} \tag{3}$$

avec

$$fc_m(t) = 13,4\ \ \sigma c_{28} \left[d(t) - 0,0023 \frac{d(7)}{t} \frac{\sum S_{FI,j} fi_j}{c} + \left(1 + \rho_c \frac{e+a}{c_{eq}}\right)^{-2,85} \right] EMP^{-0,13} \tag{4}$$

où les paramètres c_{eq} et EMP sont donnés par les relations suivantes :

$$c_{eq}(t) = c\ \left[1 + 1,1\left(1 - \exp\left[\frac{\sum K_{p,i}(t)\ pz_i}{c}\right]\right) + 0,017\ t_{C_3A}\left(1 - \exp\left[-79\frac{\sum fi_j}{t_{C_3A}.c}\right]\right)\right] \tag{5}$$

$$EMP = D_{max}\left(\sqrt[3]{\frac{g*}{g}} - 1\right) \tag{6}$$

La contribution des granulats est prise en compte par les paramètres p (adhérence pâte-granulats), q (effet limitant, qui décrit l'épuisement à la compression du granulat) et EMP ou Épaisseur Maximale de Pâte. Il s'agit de la distance qui sépare dans le béton deux grains de taille D_{max}, le plus gros grain du mélange. g est le volume solide du granulat dans le volume unité de béton et g* est la compacité granulaire de l'empilement sec. Selon [7], à un âge donné et pour un type de granulat donné, la résistance décroit quand D_{max} (et EMP)

augmentent. De même, quand g* augmente, à g et D_{max} constants, l'EMP augmente aussi (relation 6) et, par conséquent, fc_m et fc (à p et q constants) diminuent (relation 4 et 3).

Comme dans la loi de Féret, la contribution du ciment est prise en compte par σc_{28} (classe vraie à 28 jours), par c (dosage massique du ciment Portland) et par ρ_c (densité du ciment Portland). Le taux de C_3A du ciment Portland (t_{C3A}) intervient aussi, pour prendre en compte l'action liante des fillers calcaires dans le liant équivalent c_{eq}. d(t) et d(7) sont des paramètres cinétiques relatifs à la montée de la résistance dans le temps (t jours et 7 jours). Les quantité d'eau (e) et d'air (a) sont évidemment prises en compte.

La présence des fillers calcaires, ajoutés au ciment Portland ou apportés par les granulats, influe d'une part sur la résistance de la matrice liante $fc_m(t)$ dans le temps, et d'autre part sur la quantité du ciment équivalent c_{eq}. Pour la résistance, elle intervient par un effet cinétique accélérateur contrôlé par la surface spécifique S_{FI} et le dosage massique fi du fillers. Pour le liant équivalent, elle intervient par le dosage massique du fillers fi et la quantité de C_3A dans le clinker (formation de carboaluminates).

Enfin, les additions pouzzolaniques interviennent dans le calcul de c_{eq}, en considérant leur masse pz_i dans une unité de béton et leur activité liante $K_{p,i}(t)$ dans le temps, déduite de l'indice d'activité i(t) mesuré par comparaison des résistances à la compression d'un mortier contenant la pouzzolane et d'un mortier témoin.

Si tous les paramètres de ce modèle sont déterminés avec soin, sa précision est en deçà de 2 à 3 MPa [6]. Précisons toutefois que ce modèle a été calibré sur des bétons ayant généralement une structure granulaire optimisée et dont les sables ne contenaient pas une teneur en fillers (calcaires ou non) dépassant 10 %…

Ce modèle est le plus avancé en la matière car il fait intervenir les propriétés réelles des constituants et leur assemblage dans le composite. Il est implanté dans BétonlabPro2 [8].

Signalons encore que les valeurs habituelles de p et q s'inscrivent respectivement dans l'intervalle [0,5 ; 1,2] et [0 ; 0, 006 MPa^{-1}].

IV.2.2. Essais

Les mesures de résistance à la compression à différentes échéances (1, 3, 7, 14, 28, 90, 180 et 365 jours) ont été effectuées dans le laboratoire CETEC (Section Béton) sur des éprouvettes cylindriques 16×32 cm conservées dans l'eau à 20°C formées des différents mélanges hydrauliques réalisés (chapitre III). L'essai est réalisé conformément à la norme NT 21.113 [9]. Chaque éprouvette a été surfacée au soufre avant qu'elle ne soit soumise à une charge normative P croissante sous une presse jusqu'à la rupture. Le surfaçage a été effectué selon la norme N FP 18-416 [10]. Le but de cette opération est de rectifier les surfaces d'appui (Fig. IV-1), pour qu'elles soient planes et perpendiculaires à la charge axiale. L'épaisseur de la couche de surfaçage a varié entre 2 et 4 mm. La machine de compression utilisée est une presse de force maximale 3000 kN. Elle est constituée par deux plateaux. Celui du haut est fixe alors que celui du bas est relié à un piston exerçant une force axiale croissante P. Cette presse est commandée par un ordinateur (Tonitrol). Un PC enregistre directement la contrainte à la compression. La charge P est appliquée à vitesse constante de 0,5 MPa/s jusqu'à la rupture. La résistance à la compression fc, en MPa, pour la charge de rupture P_{rup}, en kN, est déduite de la relation suivante :

$$fc = 10 \frac{P_{rup}}{S} \qquad (7)$$

où S est la section de l'éprouvette en cm^2 (200 cm^2 pour une éprouvette cylindrique 16×32).

La Fig. IV-2 présente l'appareillage utilisé. Les valeurs de résistance à la compression sont récapitulées dans le Tab. IV-I. Chaque valeur présentée correspond généralement à la moyenne de trois mesures. Le nombre total d'éprouvettes testées s'élève à 432. La Fig. IV-3 présente l'état d'une éprouvette après rupture. Notons qu'avant d'entamer les essais, le CETEC a procédé à l'étalonnage de sa presse (Fig. IV-4).

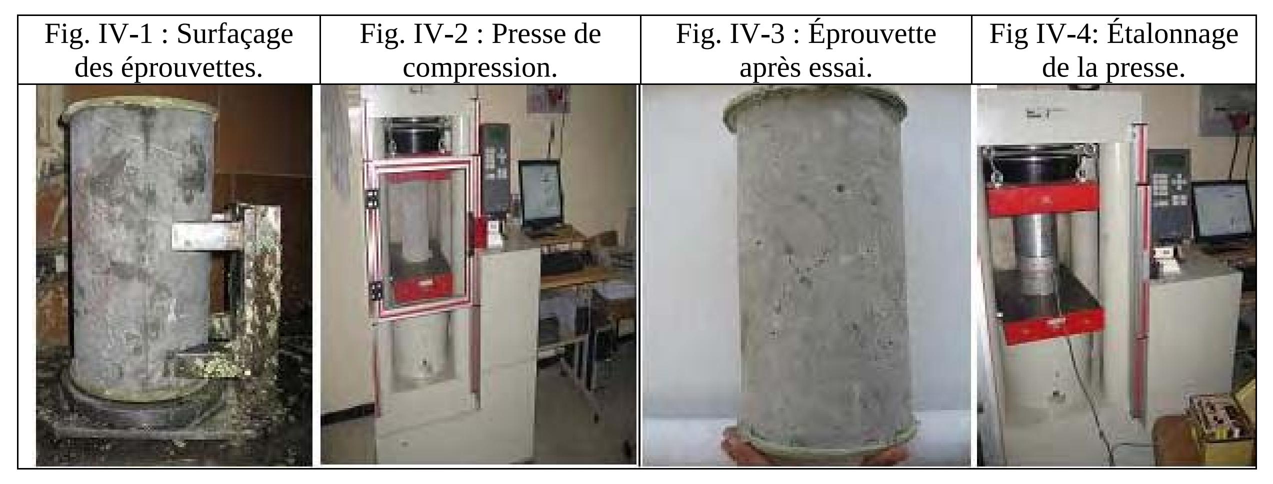


Fig. IV-1 : Surfaçage des éprouvettes. | Fig. IV-2 : Presse de compression. | Fig. IV-3 : Éprouvette après essai. | Fig IV-4: Étalonnage de la presse.

Tab. IV-I : Résistances à la compression, à la traction et modules d'élasticité des différents mélanges de chaque carrière.

		n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Granulat			Aïn Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou			Mixtes		
Mélange			a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Compression	fc_1	MPa	10,9	8,4	4,69	6,16	3,19	1,55	12,9	6,8	7,77	15,23	6,14	10,47	6	2,88	4,3	5,51	3,76	4,76
	fc_3		16	13,5	8,51	9,5	5,05	3,6	22,27	14,8	15,29	21,21	11,76	15,85	12,73	5	10,87	8,81	7,47	8,03
	fc_7		22	19,01	11,5	13,9	6,84	4,74	25,4	19,84	21,66	30,2	14,05	19,62	21,2	11,5	14,06	11,31	8,72	10,57
	fc_{14}		24	22	13	14	7,4	5,5	27	22	22,5	34	18	22	23,34	15,87	14,79	11,6	9,8	12
	fc_{28}		29,6	26	16	15,6	8,22	6,58	30,8	24,25	24,78	38,2	19,01	25,6	30	20,31	20,35	14,86	11,67	13,1
	fc_{90}		33	28,6	18,1	17,6	11,5	8,44	32,89	29	29,8	39	22	28,02	38,77	29,09	27,57	22	13,22	14
	fc_{180}		36	29	18,2	20,8	12,27	9,24	36,12	31,5	30,63	39,5	23	31,87	43,86	33,56	31,58	26	14,27	16,44
	fc_{365}		41	34	24	23,2	13,7	10,5	41,5	36,6	36,7	44,5	33	37,9	48,9	33,9	35,8	34,5	16,9	19,3
Taction	ft_1		1,8	0,98	0,45	0,66	0,34	0,24	1,34	0,85	0,86	1,56	0,62	1,14	0,7	0,39	0,42	0,65	0,38	0,42
	ft_3		1,95	1,73	0,97	1,13	0,68	0,37	2,1	1,59	1,66	2,62	1,38	1,74	1,58	1,29	1,29	0,91	0,79	0,91
	ft_7		2,67	1,87	1,35	1,3	0,91	0,5	2,33	1,92	1,95	2,9	1,77	2,26	2,07	1,88	1,83	1,24	1,01	1,24
	ft_{14}		2,81	2,25	1,48	1,35	0,95	0,73	2,68	2,13	2,45	3,05	2	2,75	2,41	2,16	2,02	1,31	1,15	1,29
	ft_{28}		3,2	2,55	1,77	1,44	1,03	0,91	3,16	2,56	2,7	3,14	2,05	3	2,99	2,55	2,51	1,56	1,3	1,49
	ft_{90}		3,27	3,09	1,9	1,53	1,2	1,03	3,6	2,6	3,1	3,22	2,31	3,19	3,83	3,17	3,08	2,17	1,34	1,5
	ft_{180}		3,45	3,28	2,04	1,9	1,5	1,04	3,94	2,9	3,16	3,68	2,5	3,22	4,4	3,48	3,37	2,44	1,46	1,56
	ft_{365}		3,78	3,43	2,34	2,03	1,57	1,09	4,1	3,37	3,45	4,04	2,59	3,24	4,65	3,61	3,7	3,05	1,58	1,85
Module d'élasticité	E_1	GPa	9,9	6,6	10,6	3,4	3,4	2	14,8	10	10,4	11	12	18						
	E_3		15,8	12	12,4	6	7	7	16	20	17,4	17	20,1	24						
	E_7		16,7	15,6	14	9	8,8	10	19,2	25,7	28,7	19	21,8	26,9						
	E_{14}		18	18	16	9,5	9,2	11,5	21,6	29	30,4	21	24	28,6						
	E_{28}		20	20,5	18,2	10	12,4	13,5	22,8	31,4	31,4	25,5	24,4	30,1						
	E_{90}		20,1	30,3	21,5	13	12,8	13,8	24,5	32,1	32,4	26,5	27,2	31						
	E_{180}		22,2	32	25,2	14	14,1	14,1	28,2	39	34	29	27,5	34						
	E_{365}		24	34	27	15	14,5	14,6	30	39,5	35,8	31	30,7	34,2						

a : mortier ; b : micro béton ; c : béton.

IV.2.3. Évolution de la résistance à la compression dans le temps

Le développement de la résistance expérimentale à la compression dans le temps est présenté sur la Fig. IV-5 par type de mélange (mortier, micro béton ou béton) et pour les différentes carrières. La comparaison des résultats, pour n'importe quelle carrière, montre (étonnamment) qu'à un âge donné, la résistance du mortier est toujours plus élevée que celle du micro béton et du béton. Certes, les mortiers contiennent plus de ciment. Mais si l'on calcule, à l'échéance 28 jours par exemple, les résistances des mélanges, en première approximation, avec les relations de Féret ou de Bolomey, en utilisant les rapports E_{eff}/C effectifs (Tab. III-II), la classe vraie du ciment (σc_{28} = 32,5 MPa) et un coefficient granulaire moyen identique pour toutes les carrières (K_b = 0,5 par exemple, relation 2 de bolomey), on

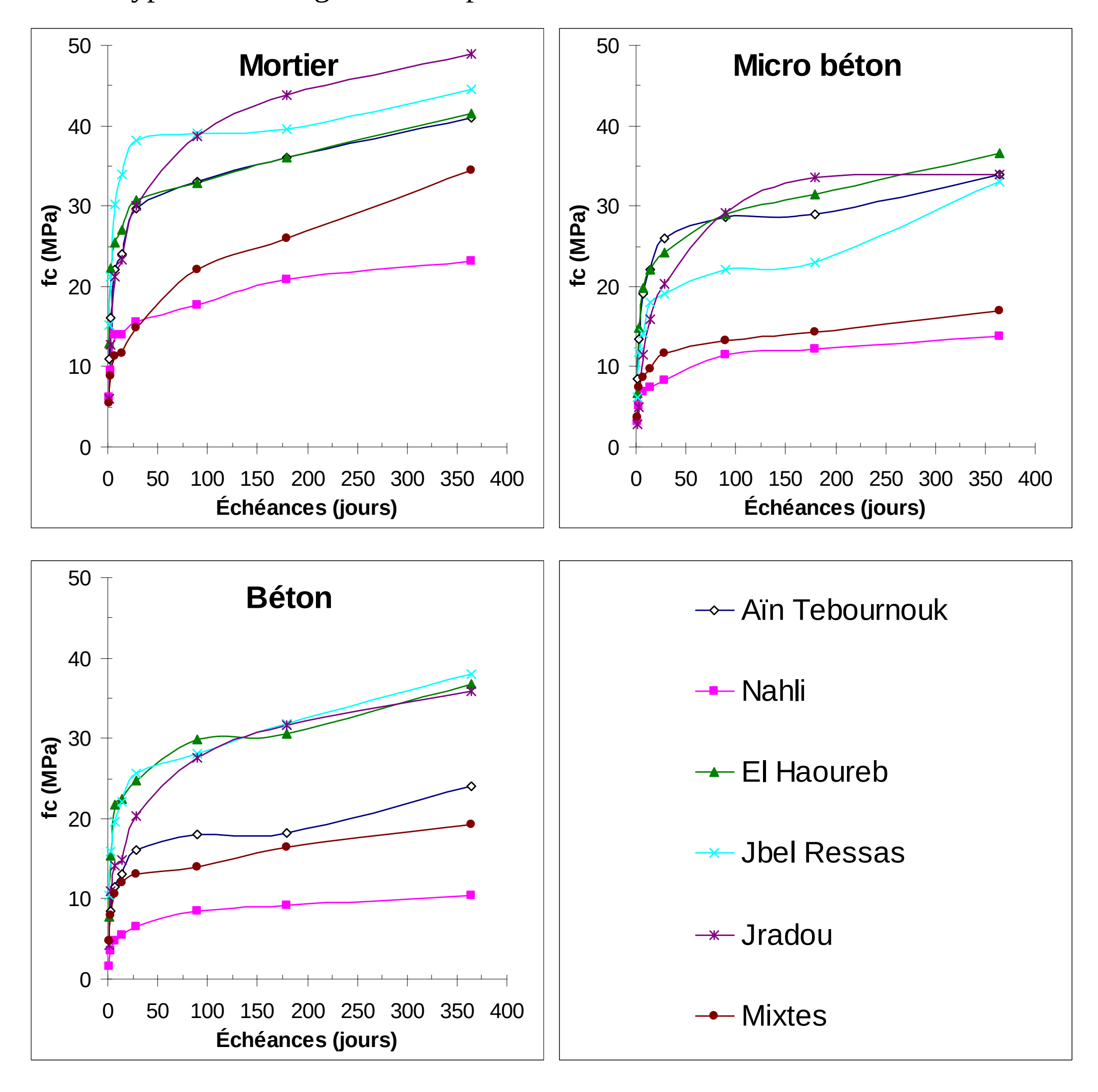
obtient des performances moins contrastées (entre type de mélange) que celles observées (Tab. IV-II). La structure granulaire et les interactions pâte-granulat sont des raisons qui peuvent être invoquées à ce stade.

Tab. IV-II : Calcul théorique de la résistance à la compression des différents mélanges de chaque carrière, selon la relation de Bolomey - Échéance 28 jours.

	n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Granulat		Aïn Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou			Mixtes		
Mélange		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
C	kg/m^3	502	392	350	552	370	319	529	373	366	540	360	345	537	350	331	377	237	283
E_{eff}	kg/m^3	291	257	222	319	207	182	252	218	206	241	222	185	294	243	221	283	140	134
E_{eff}/C		0,58	0,66	0,63	0,58	0,56	0,57	0,48	0,58	0,56	0,45	0,62	0,54	0,55	0,69	0,67	0,75	0,59	0,47
Bolomey (avec σc_{28} = 32,5 MPa et K_b = 0,5)																			
$fc_{b.28}$	MPa	19,9	16,7	17,5	20,0	20,9	20,4	26,0	19,7	20,7	28,3	18,2	22,2	21,6	15,3	16,2	13,5	19,4	26,2
Réalisé																			
$fc_{éxp.28}$	MPa	29,6	26	16	15,6	8,22	6,58	30,8	24,3	24,8	38,2	19	25,6	30	20,3	20,4	14,9	11,67	13,1
Différence		9,7	9,3	-1,5	-4,4	-12,7	-13,8	4,8	4,6	4,1	9,9	0,8	3,4	8,4	5,0	4,2	1,4	-7,7	-13,1

a : mortier ; b : micro béton ; c : béton.

Fig. IV-5 : Évolution de la résistance à la compression expérimentale fc dans le temps pour les différents types de mélanges et les sept carrières.



Dans le détail, les valeurs de résistances du **mortier** de Nahli sont les plus faibles, bien que le rapport E_{eff}/C correspondant soit comparable aux autres mortiers (Tab. Tab. IV-II) - hors mélange mixte - ; l'effet limitant du granulat, peu résistant mécaniquement (LA élevé), joue donc un rôle déterminant dans la résistance du composite. A l'inverse, le mortier de Jradou est le plus performant à long terme. Ceux de Aïn Tebournouk et de El Haoureb sont comparables au-delà de 7 jours. La montée de la résistance dans le temps des mélanges mixtes est la plus régulière. Pour les autres carrières, on constate que les courbes présentent une inflexion à partir de 28 jours environ, délai au delà duquel les performances augmentent peu. L'effet accélérateur des fillers calcaires s'estompe alors, contrairement au mélange mixte qui contient un sable siliceux. Les faibles valeurs de résistances enregistrées au jeune âge (à 1 jour et à 3 jours) pour les mélanges Mixtes (et dans une certaine mesure pour Jradou)

confirment « par défaut » le rôle accélérateur des fillers calcaires [7]. Selon F. de Larrard [5], ces faibles performances sont contrôlées par l'adhérence pâte-granulat.

Les résistances mesurées sur le **micro béton** de Nahli et du mélange Mixte sont médiocres. Ces deux mélanges sont fabriqués avec une fraction granulaire G_1 provenant de roches assez tendres (Nahli ; LA= 30 ; Tahent ; LA=32), caractérisée par une forte absorption d'eau et une faible masse volumique réelle (Tab. II-VIII). Les propriétés des constituants granulaires affectent directement la résistance du composite. C'est la confirmation du bien fondé du concept du modèle. Pour les autres carrières, les mêmes constats faits sur les mortiers sont confirmés.

Pour le **béton**, on observe les mêmes comportements que pour les micro bétons, avec toutefois des résistances encore plus faibles pour Nahli, compte tenu d'un plus fort volume granulaire de gravillons « tendres ». Les bétons de Jbel Ressas, de El Haroueb et de Jradou sont les plus performants. Ceux de Aïn Tebournouk et de Jradou ont des comportements intermédiaires.

D'une manière générale, la résistance des mélanges à 28 jours représente approximativement 70 % de la résistance à 365 jours.

IV.3. Résistance à la traction

IV.3.1. Modèles

Cette propriété intervient principalement pour les ouvrages dimensionnés à la flexion, comme les assises de chaussées par exemple. Pour les bétons de structure, cette propriété n'a que peu d'intérêt par rapport à la résistance à la compression et au module d'élasticité... Elle intervient toutefois dans le contrôle de la fissuration, pour reprendre les contraintes de traction internes dues aux différents retraits [11].

Comme pour la compression, plusieurs lois ont été proposées pour prédire la résistance à la traction par fendage ft à partir de la résistance à la compression. Une relation couramment admise pour les bétons courants est donnée par l'équation linéaire suivante [12]:

$$ft = 0,6 + 0,06\ fc \qquad (8)$$

Cette relation ne donne pas toujours satisfaction, surtout si les résistances à la compression sont faibles (ft est > 0 si la résistance à la compression est nulle !)

D'autres relations de type loi de puissance ($y=a.x^b$) sont aussi proposées [13,14]. Chaque auteur avance des valeurs particulières pour les coefficients a et b, ce qui montre les difficultés en la matière. Ces paramètres sont généralement déterminés par ajustement aux données expérimentales des couples (fc, ft). L'une des premières proposées est celle de Oluokun [13], avec des valeurs pour a et b de 0,214 et 0,69, respectivement.
Au niveau des codes de calcul des structures en béton armé, la relation proposée par la réglementation européenne (Eurocode 2 [14]), pour les bétons courants, est donnée par l'équation suivante:

$$ft = \frac{0,3\ fc^{2/3}}{0,9} \qquad (9)$$

On voit d'ores et déjà que ni la nature minéralogique du granulat, qui peut changer considérablement d'une roche à une autre, ni la résistance intrinsèque de la roche mère dont il est issu, ni la liaison pâte-granulat (cohésion dans la zone de transition) ne sont considérés dans les relations précédentes.

Récemment, F. de Larrard [5] a proposé un modèle de type loi de puissance dans lequel la résistance à la traction par fendage est déduite de la résistance à la compression élevée à la puissance 0,57 et d'un coefficient k_t qui dépend de la nature du granulat (propriétés mécaniques et pétrographiques). Ce coefficient est calibré au cas par cas sur des essais de compression et de fendage réalisés sur des bétons au squelette granulaire optimisé. Connaissant ces deux résistances (fc_1, ft_1) à la même échéance, k_t est trouvé selon la relation suivante :

$$k_t = \frac{ft_1}{fc_1^{\,0,57}} \tag{10}$$

Le coefficient k_t peut dépendre aussi du mode de conservation des éprouvettes. Pour éviter tout aléas, Baron et Sauterey [12] suggèrent que le régime thermique et hygrométrique qui règne dans les éprouvettes de béton soit similaire à celui réellement coulé dans l'ouvrage.

Si on dispose de plusieurs couples de valeurs de différents mélanges avec le même granulat, à différentes échéances, le coefficient k_t peut être estimé à partir de la moyenne des valeurs obtenues pour chaque mélange au même âge. La valeur de k_t est habituellement comprise entre 0,32 et 0,47 $MPa^{0,43}$. Selon F. de Larrard [5], si le paramètre k_t est déterminé avec soin et si les mesures des essais de compression et de traction par fendage sont effectuées avec précision, l'incertitude du modèle est de 0,17 MPa.

Contrairement aux autres modèles, ce dernier a l'avantage de faire intervenir la nature du granulat (via le coefficient k_t). Il est connu que la résistance à la traction du composite diminue lorsque le granulat n'est pas propre (présence d'argiles par exemple). Dans ce cas, on doit s'attendre légitimement à une réduction du coefficient k_t (relation 10), qui prend alors aussi en compte la liaison pâte-granulat.

IV.3.2. Essais

Des essais en traction par fendage (essai brésilien) ont été effectués sur les éprouvettes des différents mélanges hydrauliques réalisés avec les granulats sélectionnés. Ils ont été effectués conformément à la norme NF P18-408 [15]. Chaque éprouvette est couchée horizontalement dans un dispositif de fixation (Fig. IV-6), avant d'être sollicitée en compression diamétrale exercée par les plateaux de la presse, le long des deux génératrices

opposées. Le dispositif assure le centrage de l'éprouvette. Deux réglettes de contreplaqué de 5 mm d'épaisseur, placées au niveau des deux génératrices assurent un contact régulier avec les plateaux. La même presse que précédemment a été utilisée. L'effort de compression induit alors des contraintes de traction dans le plan diamétrale (Fig. IV-7). La résistance à la traction par fendage ft, en MPa, est donnée par la relation suivante [16] :

$$ft = 20\frac{P_{rup}}{\pi\ d\ h} \qquad (11)$$

où P_{rup} est la charge de rupture en kN, d et h le diamètre et la hauteur de l'éprouvette en cm.

Les valeurs obtenues sont supérieures à celles mesurées par l'essai de traction directe. C'est la raison pour laquelle un coefficient de 0,9 est utilisé dans la relation proposée par l'Eurocode 2 [14], qui considère la résistance à la traction directe.



Fig. IV-6 : Essai de fendage - Dispositif de fixation et de centrage de l'éprouvette.	Fig. IV- 7 : Appareillage de mesure de résistance à la traction par fendage

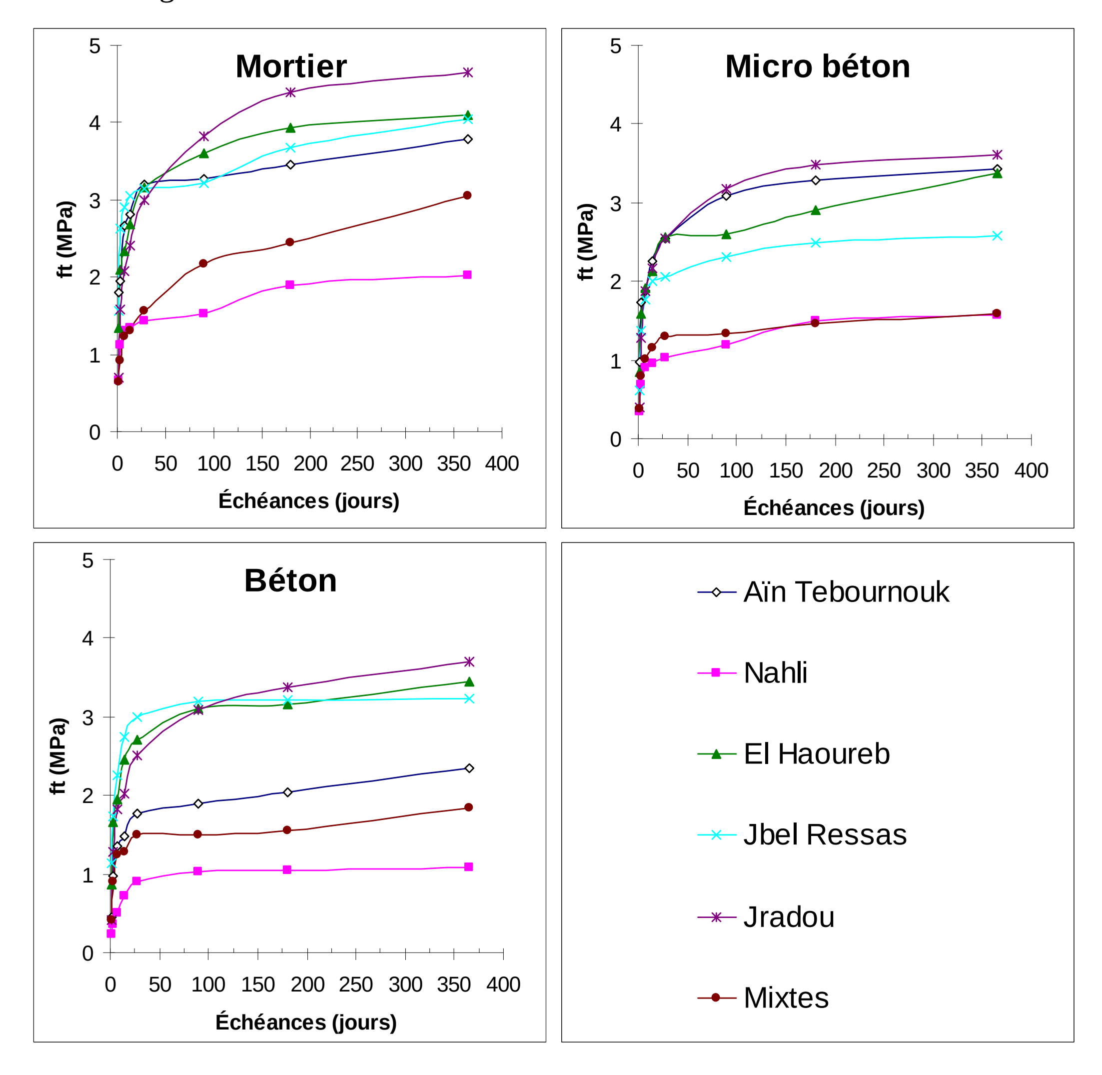
L'avantage de cet essai, par rapport, par exemple, à l'essai de flexion [17], est qu'il utilise le même type d'éprouvette et la même presse que pour l'essai de compression.

IV.3.3. Évolution de la résistance à la traction dans le temps

Les mesures de résistance à la traction au cours du temps (mêmes échéances qu'à la compression) complètent le Tab. VI-I. Le nombre total d'essai s'élève à 288 (deux mesures par mélange). Les évolutions dans le temps sont tracées sur la Fig. IV-8.

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la traction des mortiers est toujours supérieure à celle des micro bétons et des bétons, comme pour l'essai à la compression. On constate ainsi que la résistance à la traction est bien corrélée à la résistance à la compression, du moins dans la plage de performances investiguées.

Fig. IV-8 : Évolution de la résistance à la traction expérimentale ft dans le temps pour les différents mélanges de carrières.



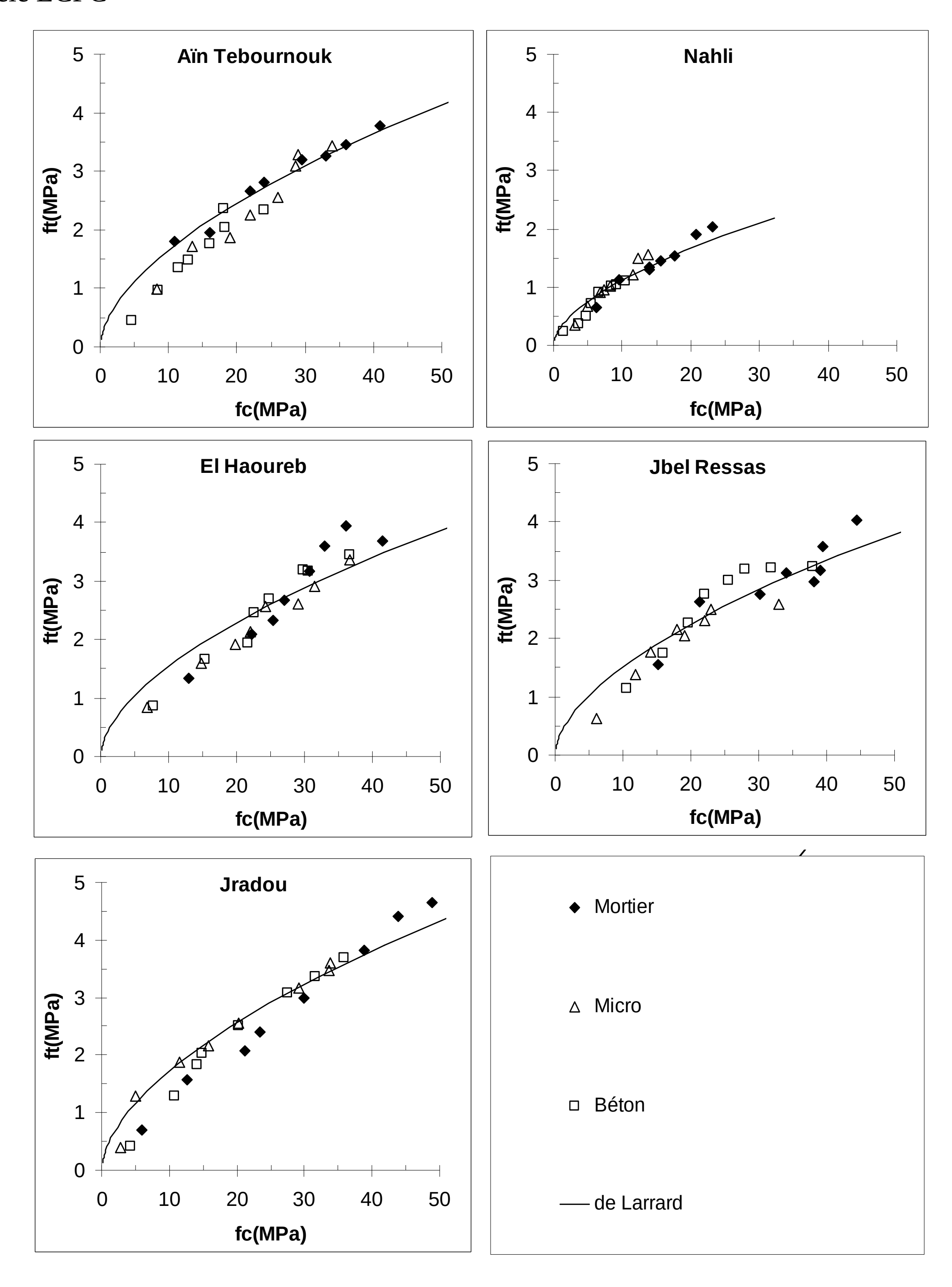
Les mortiers de Nahli présentent les performances les plus faibles, à cause vraisemblablement de la moindre résistance du granulat et de la présence d'argile dans les fillers. Elles sont nettement améliorées pour les mélanges de El Haoureb, de Jbel Ressas et de Jradou.

Pour les micro bétons et les bétons, les valeurs de résistance à la traction sont comparables entre-elles en fonction du temps et en valeurs absolues. Les performances augmentent régulièrement jusqu'à 28 jours, puis se stabilisent ensuite. Comme pour les mortiers, on observe des différences entre carrières qui peuvent être rapprochées de la nature de la roche.

Pour traduire ces comportements, les couples de résistances expérimentales (fc,ft) pour chaque carrière ont été reportés dans la Fig. IV-9. La détermination du coefficient k_t est obtenue à partir du meilleur lissage des performances mesurées (24 couples de valeurs)

satisfaisant la relation 10. Les résultats obtenus pour chaque carrière sont donnés dans le Tab. IV-III, avec les écarts moyens.

Fig. IV-9 : Relation entre la résistance à la traction ft et la résistance à la compression fc pour les différentes mélanges de chaque carrière. Ajustement des résistances expérimentales par le modèle LCPC



Tab. IV-III : Valeurs du coefficient k_t (modèle de LCPC) et écarts moyens. Carrières calcaires.

Granulat	k_t ($MPa^{0,43}$)	Ecart moyen (MPa)
Aïn Tebournouk	0,446	0,26
Nahli	0,301	0,10
El Haoureb	0,415	0,28
Jbel Ressas	0,408	0,24
Jradou	0,465	0,24

D'après les résultats obtenus, on constate que le coefficient k_t varie significativement d'une carrière à l'autre ; ce qui confirme bien qu'il est contrôlé par la nature du granulat. Les mélanges réalisés avec le granulat de Nahli ont donné la valeur de k_t la plus faible. A l'inverse ceux de Jradou ont donné la plus grande valeur. Ceux de El Haoureb et de Jbel Ressas ont donné des valeurs intermédiaires et comparables. A l'exception du granulat de Aïn Tebournouk où plusieurs valeurs de k_t donnent des ajustements proches de la solution optimale, marquée par le niveau de précision le plus élevé (si on considère tous les points expérimentaux), on peut penser légitimement que le coefficient k_t varie proportionnellement en fonction de la résistance intrinsèque de la roche mère. Le classement des sources de granulats, selon le paramètre los Angeles LA (Tab. II-XI), est alors inversé selon le coefficient k_t (Nahli < Jbel Ressas < El Haoureb < Jradou).

Notons enfin que la précision du modèle LCPC avec la plage des performances investiguée des mélanges réalisés dépasse celle prévue par le modèle (0,17 MPa). On remarque aussi que le coefficient k_t du granulat Nahli s'écarte de l'intervalle proposé par ce modèle [5].

IV.4. Module d'élasticité

IV.4.1. Modèles

Cette partie est consacrée au module élastique instantané sécant, E, mesuré sur les mélanges hydrauliques réalisés avec les granulats des carrières de Aïn Tebournouk, de Nahli, de El Haoureb et de Jbel Ressas. Par définition, ce paramètre traduit l'aptitude à la déformation sous contrainte d'un béton. Il correspond au rapport de la contrainte à la compression σc à la déformation longitudinale relative ε. Son expression est donnée par la relation suivante :

$$E = \frac{\sigma c}{\varepsilon} \qquad (12)$$

ε est sans dimension. Son expression est donnée par :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \qquad (13)$$

où L est la longueur de la base de mesure et ΔL le raccourcissement mesuré sur cette base.

Par convention, le calcul est fait pour une déformation relative ε mesurée sous une contrainte σc égale à 60% de la contrainte de rupture en compression (module sécant)

Certaines relations expérimentales relient le module élastique du béton à sa résistance à la compression fc. Ces relations sont généralement des lois de puissance. Par exemple, celle proposée dans le règlement français du béton armé BAEL [18] est donnée par la relation suivante :

$$E = 11000\ fc^{1/3} \qquad (14)$$

Elle sous-estime souvent le module élastique réel du béton, surtout pour des bétons à hautes performances. De plus, elle ne fait pas intervenir les propriétés d'élasticité des constituants (module du granulat, module de la pâte de ciment, etc.).

De Larrard [5] propose dans ses travaux un modèle plus élaboré qui repose sur un calcul d'homogénéisation (modèle trisphère [19], [20]). Le module du béton est déduit de

celui des deux phases présentes dans le composite et de la structure granulaire du mélange, décrite par les compacités g et g*. La relation s'écrit :

$$E = \left(1 + 2g\frac{E_g^2 - E_m^2}{(g^* - g)E_g^2 + 2(2 - g^*)E_g E_m + (g^* + g)E_m^2}\right)E_m \qquad (15)$$

où E_g et E_m sont respectivement les modules du granulat et de la matrice. E_m est déduit de la résistance à la compression du composite, selon la relation suivante :

$$E_m = 226 \text{ fc} \qquad (16)$$

Rappelons que g est la compacité réelle du squelette granulaire et g* sa compacité maximale (qui peut être calculée avec le MEC pour K=9)

Pour calculer E, il faut connaître au préalable le module E_g du granulat. Si celui-ci n'est pas mesuré directement sur la roche mère, on peut alors l'estimer avec une bonne précision en réalisant des bétons dont on mesure E et fc. Les relations 16 et 15 permettent alors de trouver E_g. C'est cette approche qui a été adoptée pour la suite. Elle a permis de comparer E_g à la résistance des roches mères (voir chapitre VI). Par ailleurs, d'après la relation 15, on peut vérifier que c'est bien les granulats les plus rigides qui donne les bétons les plus rigides, si tous les paramètres de la formule restent équivalents par ailleurs (E_m, g, et g*).

IV.4.2. Essais

Le module d'élasticité se mesure généralement par un essai d'extensométrie en compression. Selon la norme ISO 6784 [21], après surfaçage soigné et disposition de l'extensomètre dans la zone centrale de l'éprouvette (Fig. IV-10a), on applique sous la presse (Fig. IV-10b) trois cycles de « chargement-déchargement » jusqu'au tiers de la charge de rupture (déterminée auparavant par un essai de compression sur une éprouvette du même mélange). La mesure de la déformation s'effectue lors du troisième chargement.

Fig. IV-10 : Disposition de l'extensomètre sur l'éprouvette et mesure du module d'élasticité.

(a) (b)



IV.4.3. Évolution du module d'élasticité dans le temps

Les modules d'élasticité mesurés aux échéances de 1, 3, 7, 14, 28, 90, 180 et 365 jours sur les différents mélanges des carrières d'Aïn Tebournouk, de Nahli, d'El Haoureb et de Jbel Ressas sont portés dans le Tab. IV-I. L'évolution de cette propriété dans le temps est présentée sur les graphiques de la Fig. IV-11. Ils appellent les remarques suivantes :

- le module des mortiers est souvent inférieur à celui des micro bétons et des bétons, malgré des résistances en compression toujours supérieures (Tab. IV-I). Ce résultat peut paraître contradictoire en première analyse. Il s'explique toutefois par le rôle de la structure granulaire vis-à-vis des propriétés de résistance et de rigidité des matériaux. A titre d'exemple, pour illustrer les propos, le Tab. IV-IV présente une application des modèles précédents au cas du mortier et du béton de Aïn Tebournouk, à 28 jours. Les valeurs des paramètres de la formule (g, g*, D_{max}, C, E_{eff}) sont tirées des Tab.V-V et V-VI (chapitre V). On constate effectivement que le mortier a une résistance à la compression théorique supérieure à celle du béton, mais bien un module d'élasticité inférieur. L'explication se situe notamment dans le poids qu'a le paramètre g (volume granulaire complémentaire au volume d'eau, de ciment, de fillers et d'air) dans le contrôle de ces deux performances mécaniques. Ce calcul démontre aussi la pertinence des modèles utilisés…

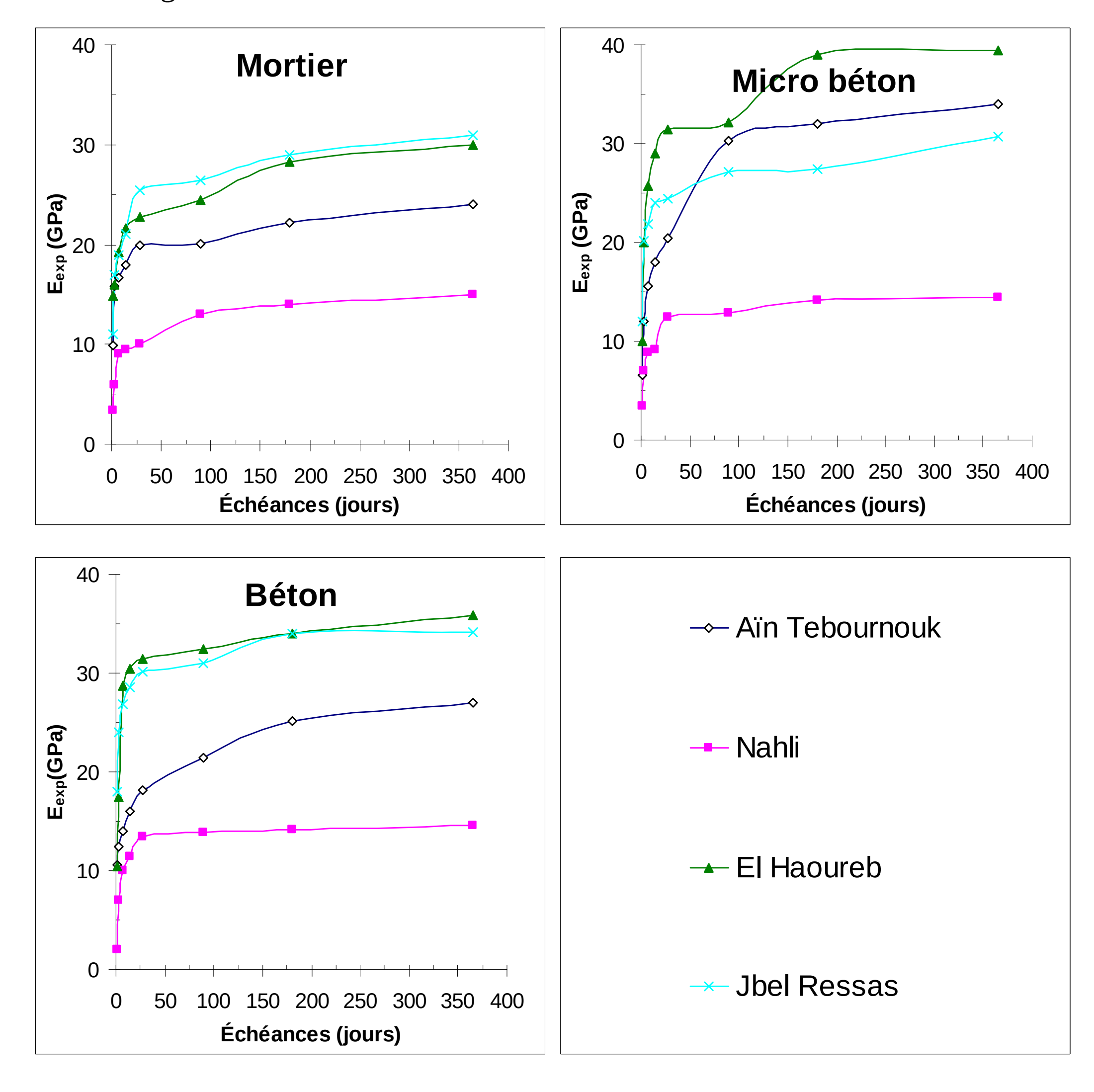
Tab. IV-IV : Calculs théoriques de la résistance à la compression et du module E du mortier et du béton de Aïn Tebournouk à 28 jours, selon les modèles du LCPC.

(Les paramètres arbitraires suivants sont retenus pour les granulats : p= 0,9 ; q= 0,003, E_g= 64 GPa. Les autres valeurs ont été déduites des formules réelles).

	g	g*	D_{max}	EMP	C	E_{eff}	fc_m	fc	E_m	E
Mortier	0,427	0,701	4,5	0,81	487	291	31,3	**25,7**	5,8	**15,3**
Béton	0,616	0,726	13	0,73	340	222	26,8	**22,3**	5,0	**24,4**

- Les modules les plus élevés sont atteints avec les mélanges de El Haoureb et de Jbel Ressas et, à un degré un peu moindre, avec ceux de Aïn Tebournouk. Les modules les plus faibles sont ceux des mélanges de Nahli… Les deux premiers granulats sont issus des deux roches mères les plus résistantes (Tab. II-XI), ceux de Nahli de la roche mère la moins résistante. Ce résultat paraît « logique », même s'il n'y a pas de relation directe entre résistance à la compression et module des granulats (et des bétons, voir ci-avant).
- Les modules augmentent rapidement entre 1 jour et 28 jours. Ensuite, l'augmentation est marginale.

Fig. IV-11 : Évolution du module d'élasticité expérimental E_{exp} dans le temps pour les différents mélanges de carrières.



IV.5. Conclusion

Les résultats de résistance à la compression, à la traction et de module d'élasticité obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux des mélanges hydrauliques courants. De médiocres performances sont toutefois observées pour les mélanges réalisés avec les granulats de Nahli et de Tahent (mixte), de moins bonne qualité. Les propriétés de ces mélanges dans le temps sont contrôlées, en première analyse, non seulement par les paramètres traditionnellement considérés, comme les dosages en ciment et en eau, et la classe de résistance du ciment, mais aussi par les propriétés des granulats, la structure granulaire, les liaisons entre la pâte et le granulat… Le rôle du granulat est manifestement complexe. La considération d'un seul paramètre granulaire (méthodes « traditionnelles ») n'est donc pas suffisante pour rendre compte de son implication réelle dans les propriétés mécaniques des composites hydrauliques. Les récents modèles LCPC prennent en compte, pour la première fois, à partir de concepts cohérents, les nombreux paramètres qui contrôlent les diverses propriétés des mélanges. Ils ont été calibrés sur des bétons ne présentant pas de pathologies particulières.

Pour vérifier la pertinence de l'application de ces modèles aux mélanges réalisés avec les matériaux sélectionnés, dont la structure granulaire n'est généralement pas optimisée, une étude détaillée est présentée dans les chapitres V et VI. Il s'agit de deux articles acceptés pour publication dans la revue « Materials and Structures, RILEM ». Le premier traite la résistance à la compression, le second de la résistance à la traction et des modules d'élasticités. Le traitement des données a fait l'objet de nombreux calculs informatique réalisés lors de séjours à l'Université Henri Poincaré de Nancy, en collaboration avec (le professeur !) André Lecomte. Le premier article est présenté sous sa version avant parution (Uncorrected Proof). Le second article est présenté sous la forme de texte soumis à la revue car, à ce jour, le document n'est pas encore parvenu pour une dernière lecture avant publication.

IV.6. Références bibliographiques

[1] Féret R., 1892, "Sur la compacité des mortiers hydrauliques", Ann PC, 7(4):5-164.

[2] Baron J., Ollivier J.P., 1996, "Les bétons – Bases et données pour leur formulation", Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles.

[3] de Larrard F (1988) Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances. Thèse ENPC, Rap. Rech. LPC 149.

[4] Bolomey J., 1935, "Granulation et prévision de la résistance probable des bétons", Travaux, 19, 30, pp. 228-232.

[5] de Larrard F., 1999, "Concrete mixture-proportioning, A scientific approach", Modern Concrete Technology, 9, S. Mindess & A. Bentur, Editors E & FN SPON, London.

[6] de Larrard F., traduit de l'anglais par A. Lecomte, 2000, "Structures granulaires et formulation des bétons". Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° OA 34, 414 pages, Avril.

[7] de Larrard F., Belloc A., 1999, "L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons", ", Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 219, Janvier-Février, pp.41-52.

[8] Sedran T., de Larrard F., 2000,"BétonlabPro2 - Logiciel de formulation des bétons", Version 2.0 exécutable sous Windows 95 et versions ultérieures, Logiciel et notice, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Juillet.

[9] Norme NT 21.113, 1990, "Béton – Détermination de la résistance à la compression des éprouvettes", INNORPI.

[10] Norme NF P 18-416, 1994, "Béton –Surfaçage au soufre des éprouvettes cylindriques", AFNOR.

[11] Baron J., Ollivier J P., 1996, "Les bétons-Bases et donnés pour leur formulation", Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles.

[12] Baron J., Sauterey R., 1982, "Le béton hydraulique - Connaissance et pratique", Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

[13] Oluokun F.A., 1991, "Prediction of Concrete Tensile Strength from Its Compressive Strength: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete", ACI Materials Journal, Vol. 88, N° 3, pp. 302-309.

[14] Norme NF EN 1992-1, 2005, "Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments", AFNOR.

[15] Norme NF P18-408, 1981, "Béton – Essai de fendage", Novembre, AFNOR.

[16] Norme NT 21.115, 1990, "Béton – Détermination de la résistance à la traction par fendage des éprouvettes", INNORPI.

[17] Norme NF P18-407, 1981, "Béton – Essai de flexion", Novembre, AFNOR.

[18] Mougin J.P., 2000, "Règles de BAEL 91 révisé 99", Editions Eyrolles.

[19] de Larrard F., Le Roy R., 1992, "Relations entre formulation et quelques propriétés mécaniques des bétons à hautes performances", Materials and Structures, RILEM, Vol.25, pp.464-475.

[20] Le Roy R., 1996, "Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances", Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 350p., Septembre.

[21] Norme ISO 6784, 1982, "Béton – Détermination du module d'élasticité statique en compression", AFNOR, Juillet.

Publications

Article 1

(Chapitre V)

Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granulat. Exemples tunisiens[1]

[1] Article accepté pour publication dans la revue « Materials and Structures » (version avant parution – Uncorrected Proof)



REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATERIAUX, SYSTEMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES

INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES

Lettre en Recommandé avec A.R.
n° RK 15 616 942 0 FR

Monsieur Taoufik ACHOUR
Direction Régionale de l'Equipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire
Avenue Charles Nicolle - Cité El Maharajène
1082 Tunis
TUNISIE

Nos/Réf. : G.C./07/2807.doc
Objet : acceptation article réf. MAAS 3119

Bagneux, le 26 juillet 2007

Cher Monsieur Taoufik Achour,

J'ai le plaisir de vous confirmer par la présente, que votre article référence MAAS 3119 "*Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granulat. Exemples tunisiens / Contribution of the fillers limestones to the paste-aggregate bond: Tunisian example*" a été accepté en date du 16 juillet 2007, pour publication dans le journal "*Materials and Structures*/ Matériaux et Constructions".

Je vous prie d'agréer, Cher Monsieur Taoufik Achour, l'expression de mes cordiales salutations.

P.O. Prof. Jacques Marchand
Rédacteur en chef

Materials and Structures
DOI 10.1617/s11527-007-9287-0

ORIGINAL ARTICLE

Contribution des fillers calcaires à l'adhérence pâte-granulat. Exemples tunisiens

Contribution of the fillers limestones to the paste-aggregate bond: Tunisian examples

Taoufik Achour · André Lecomte · Mongi Ben Ouezdou · Rachid Mensi · Imène Joudi

Received: 27 June 2006 / Accepted: 17 July 2007

Résumé *Cet article présente les résultats d'essais à la compression réalisés sur une série de mélanges hydrauliques non superplastifiés à base de granulats calcaires tunisiens. Leur résistance prévisionnelle a été calculée avec le modèle du LCPC, qui prend en compte l'effet d'adhérence à la pâte et l'effet limitant des granulats. Pour vérifier les valeurs expérimentales, le paramètre d'adhérence a dû être associé à la teneur en fillers des granulats, car les performances prédites par le modèle sont inférieures aux mesures, du moins au-delà de 10% de fillers. L'hypothèse est que la présence de ces éléments fins, de même nature que les granulats, améliore l'adhérence ou l'encrage entre pâte et granulat, grâce au rapprochement des propriétés de rigidité des deux matériaux et à une meilleure homogénéité du système. La relation trouvée entre le taux de fillers calcaire et le coefficient d'adhérence permet alors d'étendre les prévisions du modèle aux mélanges hydrauliques à base de granulats calcaires concassés, naturellement riches en fillers.*

T. Achour · M. B. Ouezdou · R. Mensi · I. Joudi
Laboratoire de Génie Civil, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunis, Tunisia

A. Lecomte (✉)
Laboratoire de Chimie du Solide Minéral, UMR 7555 - IUT Nancy-Brabois, UHP, Nancy Université, Villers-lès-Nancy Cedex 54601, France
e-mail: andre.lecomte@iutnb.uhp-nancy.fr

T. Achour
de l'habitat et de l'Aménagement des territoires, Ministère de l'Équipement, Tunis, Tunisia

Abstract This article presents compressive test results carried out on a series of hydraulic concrete mixes without admixtures based on Tunisian limestones aggregates. Their estimated strength was calculated with the French model of LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), which takes into account the effect of bond to the paste and the ceiling effect of the aggregates. To check the experimental values, the parameter of bond had to be associated the content of fillers aggregates, because the performances predicted by the model are lower than the measurements, at least beyond 10% of fillers. The assumption is that the presence of these fine elements, of comparable nature that the aggregates, improves adherence or linking between paste and aggregate, thanks to bringing together the properties of rigidity of the two materials and to a better homogeneity of the system. The relationship found between the calcareous filler ratio and the bond coefficient then makes it possible to extend the forecasts of the model to the hydraulic mixtures containing aggregates crushed limestones, naturally rich in fillers.

Motsclés Granulat · fillers calcaires · effet d'adhérence · compacité · résistance à la compression



Journal : 11527 Dispatch : 8-8-2007 Pages : 16
Article No. : 9287 ☐ LE ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3119 ☑ CP ☑ DISK

Keywords Aggregate · Limestone's fillers · Bond effect · Packing density · Compressive strength

1 Introduction

De nombreux chercheurs se sont intéressés à la modélisation de la résistance à la compression des bétons [1]. Historiquement, R. Feret [2] proposa un premier modèle pour la résistance des mortiers, basé sur la classe et la concentration solide en ciment dans la pâte fraîche. Il donne une estimation généralement satisfaisante pour la plupart des bétons courants et son écriture a été adaptée aux bétons plus performants à base de granulats résistants [3]. Une forme linéaire restreinte de la loi de Féret a été proposée ultérieurement par J. Bolomey [4]. Elle a l'avantage de faire intervenir la nature du granulat dans la résistance, par le biais d'un coefficient qualitatif estimé expérimentalement. Mais le rôle complexe du granulat dans le composite n'est pas exprimé de façon réaliste par ce coefficient unique.

Récemment, un modèle plus complet a été proposé par F. de Larrard du LCPC [5], dans lequel la résistance du béton est calculée par étapes. Il s'agit d'exprimer tout d'abord la quantité de ciment équivalent dans le temps (ciment, pouzzolanes et fillers calcaires éventuels) puis, sur la base d'une généralisation de la loi de Féret, la résistance de la matrice liante (ciment équivalent, eau, air et effet de l'épaisseur maximale de pâte) et, enfin, celle du composite. Dans ce dernier calcul, le rôle des granulats est pris en compte par le biais de deux coefficients décrivant l'effet de l'adhérence à la pâte et l'effet limitant du granulat. Ces coefficients sont déterminés à partir des performances mesurées sur plusieurs mélanges dont les résistances de matrice sont connues. Ce modèle « pâte-granulat » a été validé sur des matériaux de diverses natures, avec des mortiers et des bétons performants et équilibrés sous l'aspect granulométrique. Il a été étendu à des bétons au squelette granulaire non optimisé enclins au ressuage [6]. Par contre, sa pertinence n'a pas été vérifiée pour les mélanges riches en fillers calcaires et/ou à base de granulats peu performants. Ces matériaux peuvent toutefois constituer, pour certains bétons courants, une ressource granulaire alternative dans de nombreuses régions.

Dans le cadre d'un programme sollicité par le Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire de Tunisie, un grand nombre de mortiers, de micro bétons et de bétons ont été formulés avec des granulats calcaires provenant de sept carrières du nord et du centre du pays [7]. Leurs sables sont plutôt riches en fillers. Les résultats des essais ont été confrontés aux prévisions du modèle du LCPC. Elles sont satisfaisantes lorsque les mélanges contiennent un taux modéré d'éléments fins, même si les squelettes granulaires ne sont pas toujours de compacité optimale. Pour les mélanges plus riches en fines, une approche complémentaire, fondée sur un raisonnement physique reliant le coefficient d'adhérence à la structure granulaire, permet alors d'obtenir des résistances théoriques comparables aux valeurs expérimentales. La validité du modèle est ainsi étendue aux mortiers et bétons courants ayant des teneurs élevées en fillers calcaires.

L'article rappelle tout d'abord les principes du calcul de la résistance à la compression des mélanges hydrauliques selon le modèle du LCPC. Il présente ensuite les propriétés des matériaux de l'étude, ainsi que les formulations et les résultats obtenus. Ces données permettent de déterminer les paramètres de la matrice et de calibrer les coefficients caractérisant les roches mères. Les formules divergentes servent alors à compléter l'écriture du modèle. Enfin, une validation est faite à partir de formules mixtes à base de granulats issus de sources différentes.

2 Modèle de résistance à la compression du LCPC : Rappel

Ce modèle comporte les étapes suivantes [5] :

(1) Calcul de la quantité de ciment équivalent dans le temps $c_{eq}(t)$, en ajoutant au dosage massique en ciment Portland c la contribution des fillers calcaires de masses fi_j, qui exercent un effet liant (ici, la relation est simplifiée par rapport à l'écriture initiale car les mélanges ne contiennent pas d'additions pouzzolaniques):

$$c_{eq}(t) = c\left[1 + 0.017\, t_{C_3A}\left(1 - \exp\left[-79\frac{\sum fi_j}{t_{C_3A}\cdot c}\right]\right)\right] \quad (1)$$

t_{C_3A} est la teneur en C_3A du ciment Portland.



Journal : 11527 | Article No. : 9287 | MS Code : MAAS3119 | Dispatch : 8-8-2007 | ☐ LE | ☑ CP | Pages : 16 | ☐ TYPESET | ☑ DISK

(2) Sur la base de la loi de Féret généralisée, calcul de $fc_m(t)$—la résistance dans le temps de la matrice liante—en tenant compte de la surface spécifique $S_{FI,j}$ des fillers calcaires présents, qui exercent un effet accélérateur :

$$fc_m(t) = 13.4\ \sigma' c_{28} \left[d(t)' - 0.0023\, \frac{d(7)}{t} \cdot \frac{\sum S_{FI,j} fi_j}{c} + \left(1 + \rho_c \frac{e+a}{c_{eq}}\right)^{-2.85} \right] EMP^{-0.13} \quad (2)$$

d(t) et d(7) sont des paramètres cinétiques attachés à la montée en résistance du ciment. $\sigma' c_{28}$, ρ_c, e et a sont respectivement la classe vraie du ciment à 28 jours, la masse volumique réelle du ciment, la quantité d'eau efficace et le volume d'air. L'épaisseur maximale de pâte (EMP) désigne l'intervalle qui sépare deux gros grains de taille D_{max} (initialement en contact) après "injection" de la matrice liante dans l'empilement granulaire sec optimisé (du point de vue de la compacité). L'EMP est calculé selon la relation:

$$EMP = D_{max} \left(\sqrt{[3]}\frac{g^*}{g} - 1 \right) \quad (3)$$

où g est le volume granulaire (>80 μm) dans le volume unité de béton et g* la compacité réelle du même granulat (qui peut être calculée avec le logiciel RENE_LCPC, par exemple [8]). D_{max} correspond à la dimension du passant à 90% du mélange granulaire. Les fonctions qui contrôlent le rôle des fillers calcaires dans les relations (1) et (2) ont été calibrées sur des mortiers contenant 25% de fillers calcaires par rapport aux ciments utilisés (ayant divers taux en C_3A). Elles sont donc valides pour les essais réalisés dans le cadre du présent travail.

(3) Calcul de la résistance fc(t) du composite à partir de celle de la matrice et de deux coefficients p et q qui décrivent, l'un, l'effet de l'adhérence du granulat à la matrice, l'autre, l'effet des limites mécaniques du granulat (effet limitant ou effet plafond):

$$fc(t) = \frac{p\ fc_m(t)}{q\ fc_m(t)\ +\ 1} \quad (4)$$

Si les différents paramètres caractérisant les matériaux sont déterminés avec soin, la précision moyenne de ce modèle général est en deçà de 2 à 3 MPa. Par contre, si le squelette granulaire n'est pas optimisé, il a été montré que le coefficient p n'était pas invariant, à cause notamment du ressuage lié à la carence en éléments fins, qui altère l'adhérence entre les plus gros grains et la pâte liante [6]. Sa valeur a pu toutefois être reliée à la structure granulaire du composite, de sorte que les prédictions du modèle satisfassent aussi les résistances mesurées sur des bétons présentant cette pathologie.
Notons enfin que le rapport des coefficients p et q décrit indirectement la résistance à la compression fc_g du granulat, selon la relation empirique suivante [5]:

$$fc_g \approx 2.14 \frac{p}{q} \quad (5)$$

Les cinq types de bétons à base du même ciment CEM I qui ont servi à établir cette relation ne présentaient ni excès, ni carence en éléments fins.

3 Matériaux

Le choix des granulats retenus pour cette étude est associé à une recommandation du Ministère tunisien de l'Equipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire, qui définit les orientations stratégiques du pays en matière de ressources granulaires. Ainsi, sept carrières calcaires ont été sélectionnées pour vérifier la faisabilité de bétons hydrauliques avec leurs productions actuelles. Il s'agit des carrières de Aïn Tebournouk, de Nahli, de El Haoureb, de Jbel Ressas, de Jradou, de El Khlédia et de Tahent. Ces carrières sont repérées sur la carte reproduite Fig. 1. Le Table 1 donne l'origine géologique des matériaux ainsi que les coupures granulaires utilisées pour l'étude: un sable S, un gravillon intermédiaire G_1 et un plus gros gravillon G_2.

Les prélèvements nécessaires aux fabrications des mélanges ont été effectués en une seule fois et les essais de caractérisation usuels des granulats ont été pratiqués selon les normes tunisiennes ou AFNOR en vigueur : masse volumique réelle MVR; absorption Ab; Los Angeles LA. Sur les sables, des essais complémentaires se sont intéressés à l'argilosité des fillers: équivalent de sable ES; valeur de bleu VBta; indice de plasticité IP. Les résultats obtenus complètent le Table 1. La granularité des matériaux a été mesurée par tamisage pour les fractions supérieures à 80 μm. Celle des fillers a été obtenue par



Journal : 11527 Dispatch : 8-8-2007 Pages : 16
Article No. : 9287 □ LE □ TYPESET
MS Code : MAAS3119 ✔ CP ✔ DISK



Fig. 1 Situation des carrières tunisiennes étudiées

sédimentométrie. Les refus cumulés correspondant sont donnés dans le Table 2. Le pourcentage de fillers est rappelé dans le Table 1. Notons enfin que le sable siliceux roulé fin, issu du grès d'El Khlédia, n'a servi qu'à l'élaboration de mélanges mixtes. Les propriétés mesurées sur ces matériaux n'interdisent pas leur emploi dans les bétons, au regard de la norme française XP P 18-545, article 10, par exemple.

Le ciment utilisé est un ciment Portland dépourvu d'additions minérales autres que calcaires. Il provient de la cimenterie d'El Kharrouba, à Tunis. Il s'agit d'un ciment économique de faible performance, contenant 87.8% de clinker, 6.3% de fillers calcaires et 5.8% de gypse. Sa désignation INNORPI (normalisation tunisienne) est CPC II/A-L 32,5. Sa composition de Bogue a été déduite de l'analyse chimique fournie par la cimenterie: 70.6% C_3S, 3.2% C_2S, 2.1% C_3A et 11.9% C_4AF. Sa classe vraie dans le temps $\sigma' c_{(t)}$, à 1, 3, 7, 14, 28, 90, 180 et 365 jours, a été communiquée par le cimentier. Elle a été vérifiée expérimentalement à 28 et 90 jours. Les autres échéances ont été recoupées et ajustées sur la base d'un modèle semi-logarithmique couramment admis pour la montée en résistance des ciments [5, 9]. Les valeurs correspondantes sont données dans le Table 3. La granulométrie de ce ciment, mesurée au granulomètre laser, complète le Table 2. Les valeurs de d(t) nécessaires au calcul de fc_m (Rel. 2) sont portées dans le Table 3. Elles sont données par la relation suivante [5], à partir des valeurs $\sigma' c_{(t)}$ et $\sigma' c_{28}$ calculées données:

$$d(t) = 0.0522\left(\frac{\sigma' c_{(t)}}{\sigma' c_{28}} - 1\right) \tag{6}$$

Aucun adjuvant (superplastifiant, etc.) n'a été utilisé. Les bétons de qualité courante ainsi obtenus ont été gâchés avec l'eau du robinet.

Certaines propriétés spécifiques, nécessaires aux calculs de la compacité des mélanges avec le logiciel RENE-LCPC [8] ont été mesurées également sur les matériaux. Il s'agit des compacités Φ des fractions fines et grossières de chaque granulat (et du ciment), mesurées selon des protocoles expérimentaux conventionnels caractérisés chacun par un indice de serrage approprié [5].

Pour les fillers (<80 μm), elles sont déduites du rapport e/p qui permet d'obtenir une pâte lisse dans un malaxeur en mouvement, selon la relation:

$$\Phi = \frac{1}{1 + \rho_p \frac{e}{p}} \tag{7}$$

dans laquelle ρ_p est la densité réelle de la fraction fine testée. e et p sont les masses respectives d'eau et de poudre. Rappelons que la compacité pour les fillers calcaires est déduite par extrapolation des mesures réalisées en présence de 10 et 20% de ciment [8].

Pour les fractions comprises entre 80 μm et 5 mm, les compacités ont été mesurées sur des échantillons secs de masse Ms de 3 kg soumis à une vibration sous




Journal : 11527 | Dispatch : 8-8-2007 | Pages : 16
Article No. : 9287 | ☐ LE | ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3119 | ☑ CP | ☑ DISK

Table 1 Origine, nature, fractions granulaires et propriétés physiques et mécaniques des matériaux

Origine	Coupure		Nature couleur	Formation	MVR (kg/m^3)	Ab (%)	LA	fc_g^{**} MPa	MF***	<80 µm (%)	IP (%) < 400µm	ES 0/2	VBta (g/100 g)
Aïn Tebournouk	S	0/4	Calcaire blanc	Crétacé Sup. Abiod	2,630	2.0			2.98	17.8	8	38	3.27
	G_1	2/6.3			2,630	2.6	24	130		3.4			
	G_2	6.3/16			2,620	3.2				1.4			
Nahli	S	0/3.15	Calcaire Marneux gris	Crétacé Sup. Abiod	2,550	6.8			2.38	27.0	10	54	3.86
	G_1	10/20			2,531	7.3	30	108		5.8			
	G_2	12.5/25			2,562	7.7				2.0			
EL Haouareb	S	0/4	Calcaire dolomitique gris rosé	Jurassique	2,760	0.9			2.94	13.2	Ind.*	66	1.83
	G_1	5/12.5			2,746	1.0	20	170		1.2			
	G_2	12.5/20			2,780	1.0				0.7			
Jbel Ressas	S	0/4	Calcaire gris	Jurassique (Lias) Ressas	2,670	0.3			3.41	11	Ind.*	85	1.03
	G_1	5/12.5			2,660	0.3	22	155		1.5			
	G_2	12.5/20			2,680	0.4				0.8			
Jradou	S	0/3.15	Calcaire gris clair à gris foncé	Éocène Inf. Metlaoui	2,638	0.6			3.43	9.2	7	62	5.91
	G_1	3.15/12.5			2,390	2.6	19	178		1.3			
	G_2	12.5/20			2,480	2.0				0.7			
Tahent	G_1	5/12.5	Calcaire marneux	Éocène Metlaoui	2,404	9.8	32	99		4.6			
El Khlédia	S	0/1	Grès silic. jaune	Oligocène	2,580	1.7			1.26	12	Ind.*	73	2
El Kharrouba	C	CPCII/ A-L 32,5	Ciment gris	–	3,190					94.3			

* Indéterminé; ** voir § 5.2; *** MF = module de finesse



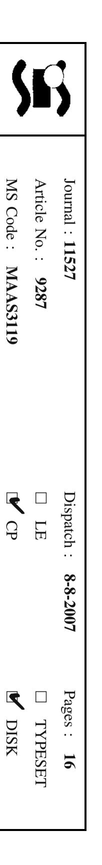

Journal : 11527
Article No. : 9287
MS Code : MAAS3119
Dispatch : 8-8-2007
Pages : 16
☐ LE
☑ CP
☐ TYPESET
☑ DISK

Table 2 Granularité des matériaux (en pourcentage de refus cumulés selon la taille)

Taille (mm)	Origine																		
	El Khar.	Ain Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou			El Khledia	Tahent
	C	S	G_1	G_2	S	G_1	G_2	S	G_1	G_2	S	G_1	G_2	S	G_1	G_2	S	G_1
0.001	7	4			5									1				
0.00125	10	4.5			6									1.5			0	
0.0016	13	5			8						0			2			0.1	
0.002	16	5.5			10			0			0.4			2.5			0.4	
0.0025	20	6.5			12			0.5			0.6			3			0.5	
0.00315	24	7.5			13			0.9			0.9			3.5			0.7	
0.004	28	8			14			1.3			1.2			4			0.9	
0.005	32	9			15.5			1.7			1.8			4.3			1	
0.0063	36	10			16.5			2			2.2			4.7			1.4	
0.008	40	11			18			2.4			3			5			1.8	
0.01	44	12			18.5			2.9			3.5			5.3			2.3	
0.0125	49	13			19			3.2			4			5.7			2.6	
0.016	54	13.5			20			4			4.8			6.1			3.2	
0.02	59	14			20.5			4.8			5.4			6.7			4.2	
0.025	65	14.5			21			5.4			5.9			7			4.9	
0.0315	71	15,			22			6			6.7			7.2			5.4	
0.04	78	15.5			22.5			6.9			7.5			7.4			6.1	
0.05	84	16			23.5			8.5			8.4			7.6			7	
0.063	89	17			25			10.8			9.2			8			8.7	
0.08	94	18			27			13.2			11			9			12	
0.1	97	19			28			16			11.6			10			16.3	
0.125	99	20.5			29			17.2			12.2			11			21.5	
0.16	100	22			31			19.3			13			12			29	
0.2		23.5			32.5			21			14			13.5			37.1	
0.25		25.5			34			23			15.2			15			49.5	
0.315		28			37			25.6			16.8			17			60.8	
0.4		30			40			28.2			19			21			71.5	
0.5		33			43.5			31.8			22			25			82.3	
0.63		37	0		47.5			35.4			25.6			28.9			88.6	
0.8		42	2		52			40.3			30			35			92	
1		46.5	3.5		57			45.2			35			42			95.2	
1.25		52	4.8		62			51			40.5			48			97	
1.6		57	6.8		69			59.2			49	0		59			97.8	
2		64	9.3		77			68.4			57.5	0.4		68	0		98.5	
2.5		71	13.7		84			77.7			66.4	1.2		82	2.8		98.8	0
3.15		79	21.3		90			86.8	0		76	2.1		94	7.3		99.1	2.7
4		87	39.3	0	96			93.6	1		87	3		98	18.9		99.5	6
5		94	57	2.6	100	0		97.1	5.8		96.4	6		100	34.5		99.6	9.7
6.3		100	88.3	10.8		0.2		100	28.8		100	18.4	0		51.2		99.8	20.6
8			98.2	32.8		1.2	0		60.7	0		52	0.4		67.2		100	44.5
10			100	54		9.8	1		87.3	3		81.5	0.6		80.8	0		70.6
12.5				81.7		39	5		98	27.4		96.6	3.5		91.1	2.4		89.8



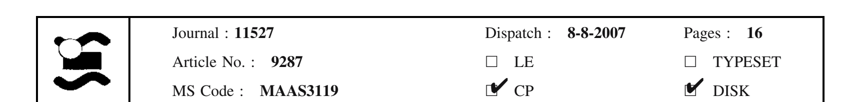

Journal : 11527
Article No. : 9287
MS Code : MAAS3119
Dispatch : 8-8-2007
Pages : 16
☐ LE
☑ CP
☐ TYPESET
☑ DISK

Table 2 continued

Taille (mm)	Origine																	
	El Khar.	Ain Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou			El Khledia	Tahent
	C	S	G_1	G_2	S	G_1	G_2	S	G_1	G_2	S	G_1	G_2	S	G_1	G_2	S	G_1
16				96		79.7	25.7		100	86.3		100	41		100	64		100
20				100		98.7	57.7			98			94			100		
25						100	90.7			100			100					
31.5							100											

contrainte de 10 kPa dans un cylindre métallique (Ø 160 mm). Φ est alors calculée selon la relation :

$$\Phi = \frac{Ms}{MVR.S.h} \qquad (8)$$

où S et h sont respectivement la section et la hauteur de l'échantillon après serrage.

Pour les fractions supérieures à 5 mm, les compacités ont été mesurées selon le même procédé, sur un échantillon de masse Ms de 7.5 kg.

Ces compacités Φ permettent de calculer les compacités élémentaires réelles puis virtuelles βi de chaque produit, avec le logiciel RENE-LCPC, en considérant respectivement un indice de serrage de 6.7 pour la pâte lisse et de 9 pour les mesures sous contrainte [5]. Dans cette approche, les compacités virtuelles βi sont supposées uniformes. Les effets de paroi du moule sont pris en compte pour les fractions grossières à partir des dimensions de l'échantillon. Le Table 4 donne, pour information, les valeurs des compacités mesurées Φ et des compacités βi pour chaque coupure de chaque matériau.

Table 3 Classes vraies dans le temps du ciment CPC II / A-L 32,5

Âge (j)	Classe vraie Annoncée $\sigma' c_{(t)}$	Classes vraies Calculées $\sigma' c_{(t)}$	d(t)
1	7.6	12.81	−0.0371
3	22.7	23.2	−0.0248
7	31.2	31.2	−0.0154
14	37.6	37.75	−0.0077
28	$(\sigma' c_{28})$ 44.3*	44.3	0
90	55.33*	55.33	0.013
180	56	61.88	0.0206
365	65	68.56	0.0285

* valeurs vérifiées expérimentalement

Enfin, les surfaces spécifiques des fillers calcaires issus des sables ont été estimées en comparant leur granularité avec celles de fillers calcaires de surfaces spécifiques connues [10]. Celle des fillers associés au ciment a été prise égale à celle du ciment, en première approximation. Les données correspondantes complètent le Table 4.

4 Formulations et propriétés des mélanges

Dix huit formules de mortiers, de micro bétons et de bétons ont été réalisées avec les matériaux décrits précédemment, utilisés tels quels (pas de lavage des granulats). Les mortiers ne contiennent que du sable et une quantité de ciment comprise entre 500 et 550 kg/m^3. Les micro-bétons et les bétons contiennent respectivement entre 350 et 400 kg et entre 320 et 370 kg de ciment par m^3. Les proportions granulaires du squelette des bétons (sables et gravillons G_1 et G_2) ont été déterminées graphiquement selon la méthode de Dreux-Gorisse [11]. Les squelettes des micro-bétons (sables et gravillon G_1) ont été volontairement disproportionnés par rapport aux mélanges théoriques (Dreux-Gorisse), afin de tester les limites du modèle de résistance. Ainsi, les micro-bétons dont le sable est riche en éléments fins (Aïn Tebournouk, Nahli) ont été appauvris en sable; ceux dont le sable contient un taux moins élevé en éléments fins (El Haroueb, Jbel Ressas, Jradou, mélange mixte) ont été, selon cet ordre, appauvris, maintenus ou enrichis en sable, dans des proportions comprises entre la moitié et 1.4 fois la quantité initialement prévue (par Dreux-Gorisse). La conséquence de ces choix est que les formules présentent des rapports



Journal : 11527 | Dispatch : 8-8-2007 | Pages : 16
Article No. : 9287 | ☐ LE | ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3119 | ☑ CP | ☑ DISK

Table 4 Surface spécifique des fillers, compacités expérimentales Φ et compacités virtuelles élémentaires *β*i des matériaux

Origine	Fractions	Surface Spécifique (m^2/kg)	Φ	*β*i
Aïn Tebournouk	fillers	550	0.625	0.4722
	0.08/4	–	0.701	0.5857
	2/6.3	–	0.643	0.6371
	6.3/16	–	0.628	0.6587
Nahli	fillers	500	0.659	0.5228
	0.08/3.15	–	0.689	0.5849
	10/20	–	0.582	0.6341
	12.5/25	–	0.564	0.6189
EL Haouareb	fillers	250	0.614	0.5284
	0.08/4	–	0.652	0.5412
	5/12.5	–	0.611	0.6471
	12.5/20	–	0.574	0.6384
Jbel Ressas	fillers	310	0.616	0.5159
	0.08/4	–	0.673	0.5847
	5/12.5	–	0.624	0.6584
	12.5/20	–	0.593	0.6660
Jradou	fillers	450	0.617	0.4949
	0.08/3.15	–	0.643	0.5626
	3.15/12.5	–	0.688	0.6922
	12.5/20	–	0.559	0.6346
Tahent	5/12.5	–	0.632	0.6526
El Khlédia	fillers	250	0.554	0.4740
	0.08/1	–	0.689	0.6474
El Kharrouba	Ciment	380	0.569	0.4196

fi/g (fillers calcaires/fraction granulaire >80 μm) très ouverts selon le type de mélanges et le taux de fillers des sables utilisés (carrières)...

Pour la fabrication des mélanges, les granulats ont été séchés à l'étuve jusqu'à masse constante et il a été tenu compte de leur absorption pour déterminer l'eau efficace e_{eff} utilisée. Le même temps de malaxage a été adopté pour toutes les formules, soit une minute à sec et deux minutes après introduction de l'eau. Les quantités d'eau initiales ont été ajustées, si nécessaire, afin d'atteindre une consistance plastique marquées par des affaissements A compris entre 50 et 90 mm, après dix minutes (délai à l'issu duquel l'absorption est en grande partie satisfaite, comme l'on montré des essais liminaires réalisés sur ce type de matériaux). Aucun raidissement significatif n'a été observé jusqu'au terme du coulage. Les caractéristiques de chaque formule sont données dans le tableau IV. Le volume théorique d'air piégé *a* dans les mélanges a été estimé à partir des quantités (kg/m^3) de sable S et de gravillons G (dépourvus de fillers), selon la relation proposée par [5], rappelée ci-dessous:

$$a = (1 - 0.00222\ A)\ (-0.000988\ G + 0.00368\ S) \qquad (9)$$

Le volume ainsi trouvé a été comparé, pour vérification, au volume d'air déduit de la pesée des éprouvettes, calculé par comparaison de la masse volumique réelle et de la masse volumique théorique des mélanges [12]. Les valeurs obtenues ont toujours été proches des valeurs théoriques qui ont été préférées pour ajuster les quantités réelles de chaque ingrédient dans le référentiel du volume unité, par ajustement des volumes partiels réalisés. Les valeurs correspondantes figurent dans le Table 5.

Chaque fabrication a permis de couler 40 éprouvettes 16 × 32 qui ont servi à mesurer la résistance à la compression (3 éprouvettes), le module d'élasticité



Journal : 11527 | Dispatch : 8-8-2007 | Pages : 16
Article No. : 9287 | ☐ LE | ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3119 | ☑ CP | ☑ DISK

puis la résistance à la traction (2 éprouvettes), aux échéances de 1, 3, 7, 14, 28, 90, 180 et 365 jours. Le nombre total d'éprouvettes réalisés et testées dans le cadre de cette étude s'élève ainsi à 720 unités. Les valeurs moyennes de résistance à la compression complètent le Table 4 (les valeurs de module et de traction ne sont pas communiquées ici).

5 Relations entre la structure granulaire et l'adhérence des granulats à la pâte

5.1 Résistance des pâtes

Le calcul de la résistance des pâtes nécessite de connaître la quantité de ciment équivalent dans chaque formule (relation 1). Elle a été obtenue en considérant la quantité réelle de clinker c, égale au dosage en ciment diminué de sa fraction de fillers calcaires, et la totalité des fillers calcaires fi_j fournis par le ciment et les granulats (sable et gravillons). Les valeurs de c_{eq} sont données dans le Table 6. Elles sont légèrement inférieures à la quantité de ciment introduites dans les formules (Table 4), à cause du faible taux de C_3A du clinker (facteur contrôlant l'effet liant des fillers).

Il s'agit ensuite d'exprimer l'épaisseur maximale de pâte (EMP) calculée selon la relation 3, à partir du:

- volume granulaire g, égal au volume des grains de taille supérieure à 80 μm, dans le volume unité de mortier, de micro béton ou de béton,
- volume granulaire g*, égal au volume maximum du mélange granulaire précédent, en l'absence des autres constituants (eau, air, fillers). Ce volume a été calculé avec le logiciel RENE-LCPC, à partir des proportions granulaires des mélanges réalisés et en considérant un indice de serrage de 9 (qui correspond à celui d'un empilement sec serré),
- diamètre D_{max}.

La résistance de la matrice dans le temps $fc_m(t)$ est alors calculée selon la relation 2, en tenant compte des quantités de fillers calcaires contenus dans le ciment, dans le sable et dans les gravillons, et de leurs surfaces spécifiques respectives (Table 4). Les valeurs de d(t) sont données dans le Table 3. Celles de g, g*, D_{max}, EMP et $fc_m(t)$ complètent le Table 6.

5.2 Résistance des mélanges: coefficients p et q

Pour la détermination des coefficients p et q (relation 4), la méthode consiste à comparer la résistance de la matrice à la résistance expérimentale de deux mélanges aux performances fortement contrastées. La résolution d'un système de deux équations à deux inconnues permet alors de trouver p et q. Si plusieurs mélanges sont testés, il faut alors que les résultats soient cohérents.

Dans le cas présent, la détermination de ces coefficients s'est faite à partir du lissage des performances mesurées sur chaque mélange dans le temps (8 couples de valeurs aux performances contrastées). Les paramètres p et q sont alors ceux qui satisfont au mieux la relation 4 en minimisant les écarts absolus par rapport aux valeurs expérimentales (utilisation d'un outil d'optimisation numérique). Pour une production de granulats donnée (même carrière), les valeurs obtenues pour un type de mélange (béton par exemple) doivent en principe être conformes à celles des autres mélanges (micro béton, mortier), puisque ces paramètres caractérisent la roche mère.

En pratique, les valeurs trouvées (non communiquées pour ne pas surcharger l'article) sont plutôt dispersées, voire même parfois en dehors des intervalles connus [5], ce qui va à l'encontre de l'existence d'une solution unique pour les valeurs de p et/ou de q...

Plusieurs phénomènes (cumulables) peuvent expliquer ce résultat : (i) les faibles résistances des matrices (ciment peu performant et rapports e/c généralement élevés), et des mélanges, amplifient les erreurs relatives, de sorte que plusieurs ajustements (couples de valeurs p et q) donnent un même ordre de précision ; (ii) dans cette plage de faibles résistances, un point marginal modifie sensiblement la position du lissage numérique, contrairement à des mélanges de meilleures performances ; (iii) certains mélanges ont des comportements trop éloignés de ceux ayant servi à l'établissement du modèle initial.

Un « simple » traitement numérique n'est donc pas suffisant dans le cas présent. Par conséquent, les données ont été interprétées une seconde fois selon la procédure suivante :

(1) Caractérisation de la résistance de la roche. Peu de mesures ont été réalisées sur les sites exploités et les valeurs trouvées sont souvent



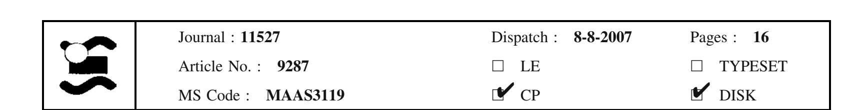




Table 5 Formulation et propriétés expérimentales des mélanges

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Granulats	Aïn Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou			Mixtes		
Mélange	A	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Dosages																		
c (kg/m^3)	502	392	350	552	370	319	529	373	366	540	360	345	537	350	331	377	237	283
e_{eff} (kg/m^3)	291	257	222	319	207	182	252	218	206	241	222	185	294	243	221	283	140	134
S^* (kg/m^3)	1,367	479	571	1,236	653	797	1,510	572	607	1,482	592	612	1,302	591	550	1,434	753	624
G_1^* (kg/m^3)	0	1,143	350	0	1,050	319	0	1,244	366	0	1,163	383	0	990	449	0	1,163	283
G_2^* (kg/m^3)	0	0	822	0	0	690	0	0	890	0	0	877	0	0	676	0	0	1,055
Propriétés																		
MVR (kg/m^3)	2,156	2,272	2,313	2,109	2,281	2,305	2,288	2,408	2,435	2,269	2,334	2,409	2,138	2,173	2,231	2,103	2,297	2,375
Air** 1	32.6	2.8	4.6	23.4	5.8	10.2	35.1	4.7	5.6	34.4	6.3	5.9	44.0	9.4	6.9	43.3	10.6	5.6
Air*** 1	33.7	2.8	5.4	22.4	5.3	10.9	36.7	4.4	5.8	32.3	7.3	3.3	41.9	9.3	5.1	38.9	8.7	7.4
A (mm)	71.0	76.5	75.0	85.0	79.5	80.0	76.5	71.0	73.0	106.0	76.0	85.5	57.0	62.0	56.0	68.5	89.0	100
fc_1 (MPa)	10.9	8.4	4.69	6.16	3.19	1.54	12.9	6.8	7.77	15.23	6.14	10.47	6	2.88	4.3	5.505	3.76	4.76
fc_3 (MPa)	16	13.5	8.51	9.5	5.05	3.6	22.27	14.8	15.29	21.21	11.76	15.85	12.73	5	10.87	8.805	7.47	8.03
fc_7 (MPa)	22	19.01	11.5	13.9	6.84	4.74	25.4	19.84	21.66	30.2	14.05	19.62	21.2	11.5	14.06	11.31	8.715	10.57
fc_{14} (MPa)	24	22	13	14	7.4	5.5	27	22	22.5	34	18	22	23.34	15.87	14.79	11.6	9.8	12
fc_{28} (MPa)	29.6	26	16	15.6	8.22	6.58	30.8	24.25	24.78	38.2	19.01	25.6	30	20.31	20.35	14.86	11.67	13.1
fc_{90} (MPa)	33	28.6	18.1	17.6	11.5	8.44	32.89	29	29.8	39	22	28.02	38.77	29.09	27.57	22	13.22	14
fc_{180} (MPa)	36	29	18. 2	20.8	12.27	9.24	36.12	31.5	30.63	39.5	23	31.87	43.86	33.56	31.58	26	14.27	16.44
fc_{365} (MPa)	41	34	24	23.2	13.7	10.5	41.5	36.6	36.7	44.5	33	37.9	48.9	33.9	35.8	34.5	16.9	19.3

a: mortier; b: micro béton; c: béton; * masse sèche; ** air calculé selon Rel. (9); *** air déduit des pesées [12]

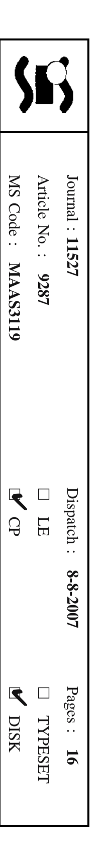

Journal : 11527
Article No. : 9287
MS Code : MAAS3119
Dispatch : 8-8-2007
Pages : 16
☐ LE
☑ CP
☐ TYPESET
☑ DISK

Table 6 Paramètres et calcul de la résistance prévisionnelle des mélanges

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Granulat	Aïn Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou			Mixtes		
Mélange	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
$c_{éq}$ (kg/m^3)	487	381	340	536	360	309	514	362	355	525	349	335	521	340	322	366	230	275
G	0.427	0.570	0.616	0.354	0.577	0.611	0.475	0.627	0.640	0.494	0.628	0.671	0.449	0.613	0.646	0.489	0.718	0.729
g*	0.701	0.684	0.726	0.689	0.736	0.765	0.652	0.695	0.728	0.673	0.709	0.752	0.643	0.732	0.754	0.689	0.813	0.803
g^*_{opt}	0.701	0.708	0.75	0.689	0.767	0.767	0.652	0.713	0.732	0.673	0.722	0.762	0.643	0.732	0.754	0.689	0.813	0.823
fi/g	0.25	0.10	0.09	0.41	0.18	0.17	0.18	0.07	0.06	0.15	0.06	0.06	0.13	0.06	0.05	0.16	0.09	0.07
D_{max} mm	4.5	6.5	13	3.15	18	25	3.5	12	18	4	12	20	3	12	18	0.08	12.5	25
EMP mm	0.808	0.408	0.729	0.783	1.520	1.952	0.390	0.419	0.790	0.434	0.495	0.775	0.381	0.731	0.952	0.085	0.526	0.815
fc_{m1} (MPa)	7.5	4.4	5.7	10.18	13.20	11.94	13.82	6.98	8.06	17.76	3.92	10.79	5.16	0.97	1.03	6.00	7.57	19.19
fc_{m3} (MPa)	10.5	9.3	9.9	12.70	15.25	13.00	20.09	13.75	14.27	23.95	10.37	16.86	11.36	3.84	5.63	10.00	11.49	24.30
fc_{m7} (MPa)	15.0	14.6	14.7	17.02	19.14	16.51	25.83	19.59	19.65	29.61	16.04	22.21	17.08	9.54	11.14	11.00	16.45	29.38
fc_{m14} (MPa)	19.2	19.4	19.1	21.17	22.92	20.07	30.75	24.53	24.19	34.47	20.85	26.75	22.01	14.24	15.68	11.23	21.00	33.83
fc_{m28} (MPa)	23.7	24.3	23.7	25.63	27.00	23.97	35.83	29.58	28.85	39.47	25.79	31.40	27.09	18.99	20.27	17.39	25.77	38.41
fc_{m90} (MPa)	31.4	32.8	31.6	33.38	34.10	30.81	44.44	38.13	36.72	47.97	34.15	39.29	35.73	26.98	28.00	27.93	34.01	46.25
fc_{m180} (MPa)	36.1	37.9	36.3	38.05	38.38	34.94	49.58	43.23	41.42	53.04	39.14	44.00	40.89	31.73	32.59	34.22	38.96	50.93
fc_{m365} (MPa)	48.8	43.2	41.1	42.8	42.8	39.9	54.9	48.4	46.2	58.2	44.2	48.8	46.2	36.6	37.3	40.7	44	55.7
P	1.136	0.945	0.716	0.567	0.332	0.281	0.934	0.884	0.884	0.917	0.913	0.883	1.197	1.162	1.061	0.880	0.409	0.374
p*	0.716			0.231			0.884			0.883			1.061			0.726	0.240*	0.231+
p/p*	1.59	1.32	1	2.45	1.44	1.22	1.06	1	1	1.04	1.04	1	1.03	1.01	1	1.21	–	–
q (MPa^{-1})	0.00258			0.001			0.00242			0.00266			0.00278			0	0.0011*	0.001+

a: mortier; b: micro béton; c: béton; *Tahent ; +Nahli



Journal : 11527
Article No. : 9287
MS Code : MAAS3119
Dispatch : 8-8-2007
Pages : 16
☐ LE
☑ CP
☐ TYPESET
☑ DISK

incohérentes. De plus, les mesures dépendent fortement des échantillons testés, de leur taille, de leur orientation et de leur situation dans le gisement. C'est pourquoi, plutôt que de considérer les données à disposition ou de réaliser des essais, il a été préféré d'estimer une résistance moyenne à la compression fc_g des granulats à partir des valeurs de Los Angeles (LA), plus représentative de la qualité globale du matériau. En première hypothèse, ces valeurs ont été tirées des graphiques publiés par Tourenq et Arquié [13] pour les calcaires. Elles complètent le Table 1.

(2) Estimation du rapport p/q pour chaque carrière. Il est obtenu à partir de la relation (5) et des valeurs de fc_g déterminées précédemment.

(3) Sélection des mélanges qui présentent un squelette granulaire optimisé et recherche des paramètres p et q qui satisfont à la fois la qualité du lissage et le rapport p/q concerné. Ces mélanges ont été détectés par validation concomitante des deux critères suivants:
   – un apport fi/g inférieur à 0.10, car les mélanges ayant servi à l'établissement du modèle LCPC présentaient cette caractéristique,
   – une compacité g* comparable à la compacité issue de la combinaison granulaire optimale, trouvée avec RENE-LCPC par itération. Cette compacité optimisée, g^*_{opt}, est donnée dans le Table 6, ainsi que les valeurs de fi/g.
   – Il s'avère que seuls les bétons de Aïn Tebournouk, de El Haoureb, de Jbel Ressas et de Jradou répondent à ces deux critères. Leurs paramètres p et q sont donc déclarés représentatifs de la roche mère. Ils sont reportés dans le Table 6. Par contre, tous les autres mélanges présentent soit un taux de fillers trop élevé, soit une compacité g* trop éloignée de la compacité optimale.

(4) recherche du paramètre d'adhérence pour les autres mélanges. Dans cette étape, l'effet limitant q est considéré invariant, car associé à la nature intrinsèque de la roche. La valeur trouvée précédemment pour chaque carrière est alors retenue pour tous les mélanges de cette carrière. En revanche, pour pouvoir restituer les propriétés mesurées, l'effet d'adhérence p est associé au taux de fillers calcaires dans la pâte, quantifié par le rapport fi/g.

L'hypothèse est que ce paramètre d'adhérence, marqueur de l'accrochage entre la pâte et le granulat, dépend non seulement de la forme et de la texture des grains (rugosité, porosité, propreté), mais aussi du contraste des propriétés mécaniques entre les deux matériaux en contact (sans oublier une éventuelle liaison épitaxique entre pâte et granulat). En d'autres termes, toutes choses égales par ailleurs, l'adhérence sera meilleure si pâte et granulat sont de rigidités proches que si leurs rigidités sont contrastées.

En considérant la pâte comme une phase homogène, on peut aisément admettre, sans nécessairement recourir à un modèle d'homogénéisation, que plus elle contiendra de fillers calcaires, plus ses propriétés de rigidité se rapprocheront de celles du granulat calcaire et, par suite, meilleure sera l'adhérence pâte-granulat (le mélange étant mécaniquement plus homogène). La résistance expérimentale sera alors supérieure à celle annoncée par le modèle, bien que la résistance de la matrice soit celle prévue. Notons subsidiairement que la présence de fillers limite le phénomène de ressuage, ce qui évite une altération du contact pâte granulat. Enfin, l'excès de fillers rend les mélanges particulièrement collants, en l'absence notamment d'adjuvants appropriés.

Dans cette approche, on désigne par p* le coefficient d'adhérence déterminé sur les mélanges optimisés (bétons) et par p le coefficient mesuré sur les autres mélanges plus riches en fillers calcaires (mortiers et micro bétons). Les valeurs de p ont été trouvées comme précédemment, par optimisation du lissage des points expérimentaux, en considérant le paramètre q approprié. Les valeurs de p et de p* sont portées dans le Table 6. Pour chaque carrière, les points expérimentaux comparant fc à fc_m et les lissages associés sont présentés sur la Fig. 2.

Les courbes caractéristiques de la roche mère (courbes maîtresses), déterminées pour les paramètres p* et q, sont également tracées sur ces graphiques.

On constate que les valeurs de p* varient sensiblement selon les carrières, indiquant une adhérence satisfaisante pour les matériaux de Jradou, une adhérence un peu moindre pour ceux de El Haroueb et de Jbel Ressas, et une adhérence plus faible pour ceux de Aïn Tebournouk. Notons que les valeurs du coefficient p* sont inférieures à 1 (excepté pour



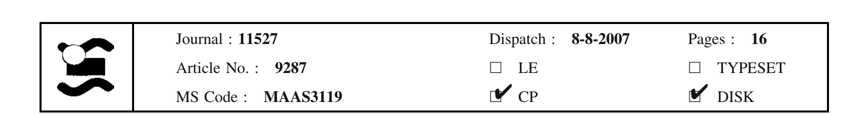


Fig. 2 Relations entre la résistance expérimentale fc et la résistance de la matrice fc_m pour les différents mélanges de chaque carrière. Les points correspondent aux résistances mesurées (fc) et calculées (fcm) aux différentes échéances

Jradou), ce qui peut paraître faible pour des calcaires réputés avoir une bonne affinité avec la pâte de ciment [14]. Mais le paramètre d'adhérence est affecté aussi par la propreté des grains (ES, VBta, IP), qui est plutôt médiocre pour ces matériaux (Table 1).

Pour une même carrière, l'adhérence p augmente généralement lorsque les mélanges deviennent plus fins, c'est-à-dire lorsqu'ils contiennent plus de sable et (donc) plus de fillers. L'augmentation relative p/p* est naturellement plus marquée pour les matériaux de valeur p* moindre. Toutefois, ce rapport est peu élevé pour les mortiers et micro bétons de El Haroueb, de Jbel Ressas et de Jradou, qui contiennent un taux plutôt modéré de fillers. Il atteint 1,6 pour le mortier de Aïn Tebournouk contenant 25% de fillers.



Journal : 11527 | Dispatch : 8-8-2007 | Pages : 16
Article No. : 9287 | ☐ LE | ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3119 | ☑ CP | ☑ DISK

5.3 Relations entre coefficient d'adhérence et teneur en fillers calcaires

Les comportements observés sur ces mélanges peuvent être modélisés en rapprochant les coefficients p d'un ou de plusieurs paramètres de la structure granulaire. La première hypothèse a été de considérer l'indice de serrage partiel K_f de la fraction fine, qui décrit le niveau de serrage de cette tranche granulaire dans le mélange complet. Sa valeur caractérise de façon univoque chaque formulation considérée. K_f est calculé selon la relation suivante [5]:

$$K_f = \sum_{i=1}^{n} Ki = \sum_{1=1}^{n} \frac{\frac{\Phi\ i}{\Phi\ i^*}}{1 - \frac{\Phi\ i}{\Phi\ i^*}} \tag{10}$$

où Φ_i est la compacité de la classe i et Φ_i* la valeur maximale que peut prendre Φ_i lorsque la classe i est dominante, toutes les autres classes demeurant à volume constant (Φ_i* est calculé par exemple avec le Modèle d'Empilement Compressible associé à RENE-LCPC). n désigne ici la classe élémentaire de taille 80 µm. Mais cette approche s'est révélée peu fructueuse car elle ne distingue pas suffisamment le ciment des fillers calcaires, qui ont des effets comparables du point de vue de la compacité et du serrage, mais pas de l'adhérence.

Une autre approche est de comparer le rapport p/p* à fi/g (Fig. 3). On observe alors une augmentation substantielle de l'adhérence au-delà d'un taux de fillers de 10% dans le granulat. Ce comportement peut être décrit de façon satisfaisante par une simple branche de parabole d'équation:

$$p/p^* = 1 + 9(\mathrm{fi}/\mathrm{g})^2 \tag{11}$$

Cette relation constitue alors un modèle complémentaire pour le calcul de la résistance à la compression des bétons calcaires non superplastifiés ayant des taux élevés de fillers. Sa mise en œuvre nécessite toutefois de déterminer, pour une carrière donnée, le coefficient d'adhérence p* à partir d'essais réalisés sur des mélanges ayant un taux de fillers inférieur à 10% de la masse des granulats.

5.4 Cas des mélanges de Nahli

Pour cette carrière, aucun des mélanges ne présentait un taux de fillers inférieur à 10%. Ils ont donc été écartés de l'interprétation précédente. Toutefois, dans une démarche inverse, le modèle proposé permet de déduire le rapport p/p* à partir du ratio fi/g des mélanges réalisés, puis la valeur de p* à partir des valeurs de p issues du lissage des points expérimentaux (on suppose ici que la valeur de l'effet limitant q est celle déterminée sur les bétons). On obtient ainsi une valeur unique de p* qui vérifie à la fois les performances mesurées et la relation 4 (reliant fc_g à p*/q). On constate alors que l'effet d'adhérence caractéristique des matériaux de cette carrière (p* = 0.231) est particulièrement faible, mais toutefois représentatif de la moindre qualité de la roche (Table 1) et des médiocres performances obtenues sur les mélanges hydrauliques (Fig. 2).

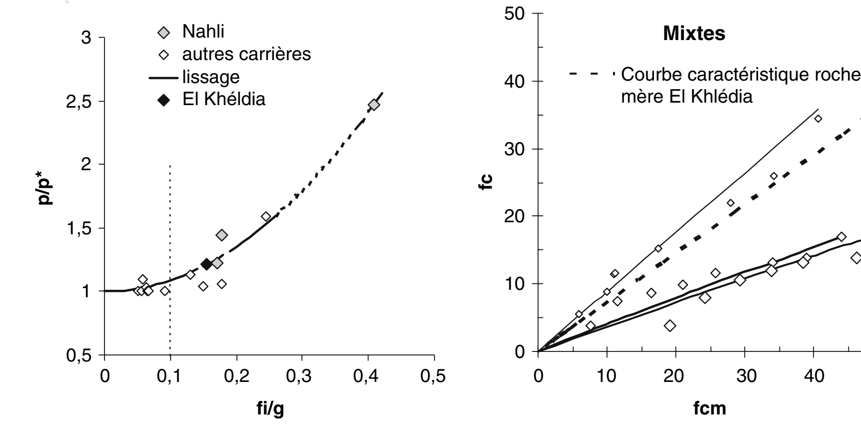


Fig. 3 Ajustement de la fonction p/p* = f(fi/g) et validation sur mélanges mixtes




Journal : 11527
Article No. : 9287
MS Code : MAAS3119
Dispatch : 8-8-2007
Pages : 16
LE
CP
TYPESET
DISK

6 Validation

Trois mélanges complémentaires ont été réalisés pour valider l'approche proposée, sur la base du principe expérimental précédents (essais entre un jour et un an). Ils ont consisté à fabriquer un mortier avec le sable roulé de El Khlédia, un micro béton avec ce même sable et le gravillon G_1 de Tahent, puis un béton avec les ingrédients précédents auxquels il a été ajouté le gravillon G_2 de Nahli. L'exploitation des résultats issus de ces mélanges mixtes a été réalisée selon la démarche suivante:

(1) détermination des paramètres p* et q du sable roulé de El Khlédia, à partir des résultats mécaniques mesurés sur le mortier aux différentes échéances et des résistances des matrices correspondantes (Fig. 3). Comme le mélange contient plus de 10% de fillers, cette valeur de p* est déduite du modèle (relation 11), à partir du rapport fi/g et de la valeur de p issue du lissage (pour lequel on trouve q = 0). Les valeurs correspondantes sont données dans le Table 6, colonne 16.

(2) détermination des paramètres p* et q du gravillon G_1 de Tahent, à partir des résultats mécaniques mesurés sur le micro-béton, aux différentes échéances. Comme le mélange contient moins de 10% de fillers, les valeurs de p* et de q de ce gravillon sont déduites des valeurs p et q issues du lissage (Fig. 3), après pondération avec les paramètres p et q du sable selon les proportions volumiques respectives de ces deux constituants dans le mélange. Les valeurs correspondantes sont données dans le Table 6, colonne 17. Les valeurs obtenues pour le gravillon de Tahent vérifient les caractéristiques mécaniques de la roche mère, à travers des relations entres p*/q, fc_g et LA.

(3) détermination des paramètres p* et q du gravillon G_2 de Nahli, à partir des résultats mécaniques mesurés sur les bétons. Comme précédemment (taux de fillers inférieur à 10%), les valeurs de p* et de q de ce gravillon sont déduites des valeurs p et q issues du lissage (Fig. 3), après pondération des paramètres du sable et du gravillon G1 selon leurs proportions respectives dans le mélange. Les valeurs correspondantes sont données dans le Table 6, colonne 18.

On constate que les valeurs obtenues pour le gravillon de Nahli sont cohérentes avec celles déterminés précédemment pour la roche mère, ce qui constitue une validation de la démarche. L'application de ce modèle (relation 11) à des mélanges mixtes montre ainsi qu'il a été possible de caractériser les paramètres d'adhérence et d'effet limitant de mélanges, mêmes riches en fillers, à base de granulats différents.

7 Conclusion

Les nombreuses mesures de résistance à la compression réalisées dans le cadre de ces travaux ont servi à calibrer les paramètres d'adhérence et d'effet limitant d'une large variété de granulats calcaires tunisiens. Ces paramètres ont été calculés avec le modèle du LCPC, en comparant la résistance des composites à la résistance de leur pâte liante.

Toutefois, le taux de fillers élevé dans la plupart des formules conduit à des paramètres d'adhérence variables selon les mélanges. L'hypothèse vraisemblable est que les fillers calcaires associés à la pâte de ciment modifient les propriétés de rigidité de la matrice, de sorte qu'elles se rapprochent de celle du granulat, améliorant ainsi le comportement et l'ancrage mécanique de la liaison et, finalement, la résistance prévue du composite.

En rapprochant le paramètre d'adhérence du taux de fillers dans les mélanges, une extension du modèle est proposée. Elle permet de retrouver les caractéristiques moyennes de la roche mère, même si les proportions granulaires et le taux de fillers des mélanges testés ne sont pas toujours optimisés. Le modèle ainsi complété est alors mieux adapté pour la caractérisation des matériaux calcaires souvent riches en éléments fillérisés, qui conduisent généralement à des mélanges courants de résistances peu élevées. Des travaux complémentaires réalisés par exemple avec les mêmes granulats mais des matrices de résistance et de rigidité différentes (autres ciments) permettraient de vérifier la validité de l'extension de la loi sur l'effet d'adhérence, et de donner un argument supplémentaire à l'hypothèse basée sur la compatibilité des rigidités.



Journal : 11527 | Dispatch : 8-8-2007 | Pages : 16
Article No. : 9287 | ☐ LE | ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3119 | ✔ CP | ✔ DISK

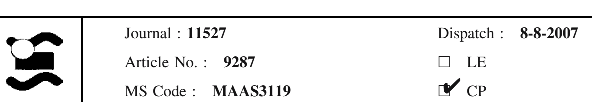
Par ailleurs, ces travaux fournissent des données nouvelles qui aideront à valoriser et à mieux choisir les ressources granulaires calcaires tunisiennes destinées à la fabrication des mélanges hydrauliques de demain.

Remerciements Les auteurs remercient plus particulièrement Madame le Ministre et les cadres du Ministère de l'Equipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire Tunisien, ainsi que les exploitants des carrières étudiées, qui ont apporté un soutien précieux à la réalisation de ces travaux.

Références bibliographiques

1. Neville AM (1995) Properties of concrete. Longman ed, Harlow
2. Feret R (1892) Sur la compacité des mortiers hydrauliques. Ann PC 7(4):5–164
3. de Larrard F (1988) Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances. Thèse ENPC, Rap Rech LPC 149
4. Bolomey J (1935) Granulation et prévision de la résistance probable des bétons. Travaux 19(30):228–232
5. De Larrard F (1999) Concrete mixture proportioning. A scientific approach. Modern concrete technology, 9, S. Mindess & A. Bentur, editors E & FN Spon, London
6. Lecomte A, de Larrard F, Mechling JM (2005) Predicting the compressive strenght of concrete, the effect of bleeding. MCR 57(2):73–86
7. Achour T (2007) Influence des caractéristiques des granulats calcaires sur les propriétés des mélanges hydrauliques. Exemples tunisiens. Thèse de doctorat ENIT (en cours)
8. Sedran T, de Larrard F (1994) RENE-LCPC – Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux du génie civil. Note technique. BLPC 194
9. Kim JK, Park YD, Sung KY, Lee SG (1992) The production of high-strength fly ash concrete in Korea. In: Proceedings of the 4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary papers, Istanbul, May
10. UNPG (1994) Recherche taxe parafiscale EG 121 : Points des connaissances sur les bétons calcaires
11. Dreux G (1970) Guide pratique du béton. ITBTP
12. Lecomte A (1998) Ajustement des méthodes de formulation de béton au m^3 en tenant compte du volume réel. Annales du BTP (5):13–26
13. Tourenq C, Arquié G (1989) Granulats. Presses ENPC, Paris
14. Day KW (1995) Concrete mix-design. Quality Control and Specification. E & FN SPON





Article 2

(Chapitre VI)

Résistance à la traction et module d'élasticité des bétons calcaires : Application à des mélanges tunisiens[2]

[2] Article accepté pour publication dans la revue « Materials and Structures » (version soumise à la revue)



REUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATERIAUX, SYSTEMES DE CONSTRUCTION ET OUVRAGES

INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES

Lettre en Recommandé avec A.R.
n° RK 15 616 939 3 FR

Monsieur Taoufik ACHOUR
Direction Régionale de l'Equipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire
Avenue Charles Nicolle - Cité El Maharajène
1082 Tunis
TUNISIE

Nos/Réf. : G.C./07/2807.doc
Objet : acceptation article réf. MAAS 3321

Bagneux, le 20 juillet 2007

Cher Monsieur Taoufik Achour,

J'ai le plaisir de vous confirmer par la présente, que votre article référence MAAS 3321 "*Résistance à la traction et module d'élasticité des bétons calcaires : application à des mélanges tunisiens*" a été accepté en date du 16 juillet 2007, pour publication dans le journal ""*Materials and Structures*/ Matériaux et Constructions".

Je vous prie d'agréer, Cher Monsieur Taoufik Achour, l'expression de mes cordiales salutations.

P.O. Prof. Jacques Marchand
Rédacteur en chef

Materials and Structures
DOI 10.1617/s11527-007-9340-z

ORIGINAL ARTICLE

Résistance à la traction et module d'élasticité des bétons calcaires: application à des mélanges tunisiens

Tensile strength and elastic modulus of calcareous concrete: application to Tunisians' mixtures

Taoufik Achour · André Lecomte · Mongi Ben Ouezdou · Rachid Mensi

Received: 19 April 2007 / Accepted: 3 December 2007

Résumé Cet article présente les résultats de traction et de module d'élasticité obtenus entre un jour et un an sur un vaste ensemble de mortiers, de micro-bétons et de bétons réalisés avec des granulats calcaires issus de cinq carrières tunisiennes. Pour la traction, les résultats ont été comparés aux résistances en compression mesurées sur les mêmes mélanges. Les évolutions obtenues ne coïncident pas avec les lois de puissance généralement adoptées pour prédire cette propriété. Une approche où les paramètres de la loi (coefficient, exposant) peuvent être ajustés aux données donne de meilleurs résultats. Le recours à un autre modèle plus précis, décrit par une loi hyperbolique, permet d'apporter une interprétation physique au comportement à la traction des mélanges hydrauliques. Ses paramètres sont reliés à la résistance du granulat et à la cohésion dans la zone de transition pâte-granulat. Pour les modules, l'utilisation d'un modèle prenant en compte les propriétés de la phase granulaire et de la phase liante a permis d'atteindre le module d'élasticité des granulats.

Abstract *This article presents the results of the tensile strength and the elastic modulus obtained between one day and a year on a vast set of mortars, micro-concretes and concretes carried out with limestone aggregates out coming from five Tunisian careers. For the tensile strength, the results were compared with the compression strength measured on the same mixtures. The obtained evolutions do not coincide with the power-laws generally adopted for the predicted tensile strength. An approach, where the law parameters (coefficient, exponent) can be adjusted, gives better results. The resort to another more precise model, described by a hyperbolic law, makes it possible to provide a physical interpretation to the tensile strength behavior of the hydraulic mixtures. Its parameters are linked to the aggregate strength and cohesion in the paste-aggregate transition zone. For the elastic modulus, the use of a model taking into account the properties of the granular phase and the binding phase made it possible to reach the elastic modulus of the aggregates.*

Mots clés Traction par fendage · Compression · Module d'élasticité · Granulats · Bétons calcaires · Modèles · Loi de puissance · Loi hyperbolique

T. Achour · M. B. Ouezdou · R. Mensi
Laboratoire de Génie Civil, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Tunis, Tunisie

T. Achour · A. Lecomte (✉)
Laboratoire de Chimie du Solide Minéral, UMR 7555, Nancy Université, UHP, Nancy, France
e-mail: andre.lecomte@iutnb.uhp-nancy.fr

T. Achour
Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire, Tunis, Tunisie



Keywords Splitting tensile strength · Compression strength · Elastic modulus · Aggregates · Limestone concretes · Models · Power's law · Hyperbolic law

1 Introduction

Dans le cadre de mesures liées au développement durable, le Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire de Tunisie a initié un programme de recherches portant sur la faisabilité de mélanges hydrauliques avec les ressources calcaires nationales [1]. Un autre objectif est d'utiliser les sables de concassage jusqu'ici écartés de tout usage. Dans ce but, les granulats de cinq carrières du nord et du centre du pays ont été utilisés pour fabriquer des mortiers, des micros bétons et des bétons de qualité courante (résistance à la compression inférieure à 40 MPa à 28 jours). Il s'agit des carrières d'Aïn Tebournouk, de Nahli, d'El Haoureb, de Djebel Ressas et de Jradou. Un sable siliceux roulé provenant de la carrière d'El Khlédia a servi aussi à la fabrication de mélanges mixtes. Ces derniers contenaient également un gravillon calcaire provenant de la carrière de Tahent. La situation géographique des carrières, les propriétés des matériaux, les formules réalisées et les résultats des essais en compression ont été présentés dans un article antérieur [2].

Le présent travail s'intéresse plus particulièrement à la résistance à la traction et au module d'élasticité des mélanges. La résistance à la traction a été mesurée par fendage sur éprouvettes cylindriques 16 × 32 conservée dans l'eau à 20°C. Les modules ont été mesurés sur le même type d'éprouvettes, après détermination de la résistance à la compression. Les essais ont été réalisés selon les protocoles normalisés [3, 4].

Pour la résistance à la traction et selon la démarche habituelle, les résultats obtenus ont été comparés à la résistance à la compression des mêmes mélanges. Les évolutions observées ne coïncident pas toutes avec les modèles conventionnels, de type loi de puissance ($y = a \cdot x^b$), comme par exemple ceux de Oluokun [5], de de Larrard [6] ou de l'Eurocode 2 [7]. Dans ces modèles, les paramètres a et/ou b sont fixés. Le comportement des mélanges calcaires est ainsi distingué. De meilleurs ajustements sont obtenus avec une loi de puissance ou une loi hyperbolique ($y = a \cdot x/(b.x + 1)$) dont les paramètres a et b sont associés aux propriétés des granulats ou de la liaison pâte-granulat.

Pour le module d'élasticité, le traitement des résultats selon le modèle du LCPC [6] a permis d'estimer le module des granulats. Les valeurs sont cohérentes avec les propriétés mécaniques mesurées sur les matériaux.

L'article rappelle tout d'abord le formalisme des modèles de caractérisation des propriétés de traction et d'élasticité des bétons. Il présente ensuite les paramètres des formules, les résultats mécaniques obtenus et leur confrontation aux modèles. Pour la traction, une extension, valide du moins pour les bétons calcaires, est alors proposée.

2 Modélisation de la résistance à la traction et de l'élasticité des bétons. Rappels

2.1 Résistance à la traction

L'approche empirique traditionnelle pour estimer la résistance à la traction ft d'un béton consiste à déduire cette propriété de la résistance à la compression fc, selon une loi de puissance de type:

$$ft = m(fc)^n \quad (1)$$

où m et n sont deux paramètres d'ajustement.

En pratique, il existe souvent plusieurs couples (n, m) qui peuvent satisfaire un ensemble de résultats expérimentaux, en particulier s'ils concernent diverses natures de granulats ou de liants [8], voire différentes gammes de performance. Cependant, par souci de simplification, plusieurs auteurs proposent des modèles généralisés ayant des paramètres constants. Ainsi, par exemple, pour les bétons courants, Oluokun [5] adopte, à partir de données tirées de la littérature, les valeurs 0,214 et 0,69 pour m et n, respectivement

$$ft = 0.214(fc)^{0.69} \quad (2)$$

Dans une étude plus récente portant sur des bétons performants, de Larrard [6] propose un exposant constant de 0,57 et un coefficient k_t variable, qui dépend de la nature du granulat

$$ft = k_t(fc)^{0,57} \quad (3)$$

Cette approche demande de déterminer le paramètre k_t pour chaque granulat. Un seul couple de résultats en compression et au fendage, classiquement



mesurés sur les bétons, suffit en principe. Mais un plus grand nombre de points permet d'obtenir une valeur plus fiable, par un processus de lissage, par exemple.

Au niveau réglementaire européen, la relation retenue par l'Eurocode 2 [7] pour les bétons de résistance à la compression inférieure à 50 MPa est:

$$ft_d = 0.3(fc)^{2/3} \quad \text{ou encore} \quad ft = \frac{0.3fc^{2/3}}{0.9} \tag{4}$$

ft_d est la valeur de la résistance en traction directe. ft est celle obtenue par fendage. Le coefficient 0,9 correspond à l'équivalence entre les deux modes de mesure.

Toutefois, comme on le verra plus loin, les approches décrites par les relations 2, 3 et 4 ne reflètent pas de façon satisfaisante les résultats obtenus avec les bétons calcaires réalisés dans le cadre de cette étude. Seuls les ajustements où les paramètres m et n sont optimisés à la fois donnent des résultats réellement pertinents, avec des valeurs différentes pour chaque carrière. Une autre approche donne un niveau de précision équivalent, du moins pour la plage de performances investiguée. Elle consiste à déduire la traction de la compression à partir d'une loi hyperbolique de la forme:

$$ft = \frac{p'fc}{q'fc + 1} \tag{5}$$

où p' et q' sont deux coefficients qui dépendent des propriétés mécaniques de la liaison pâte-granulat et du granulat. Par ailleurs, ce formalisme est comparable à celui proposé par [6] pour le calcul de la résistance à la compression à partir de la résistance de la matrice fc_m du béton, selon la relation:

$$fc = \frac{pfc_m}{qfc_m + 1} \tag{6}$$

où les coefficients p et q traduisent respectivement un effet d'adhérence du granulat à la pâte et un effet limitant du granulat. Rappelons que les résistances à la compression des mélanges calcaires de la présente étude ont été modélisées selon cette approche [2].

2.2 Module d'élasticité

Comme pour la résistance à la traction, de nombreux modèles sont proposés pour relier le module d'élasticité à la densité ou à la résistance à la compression du béton [9]. Dans le cadre de ce travail, l'approche proposée par [6], inspirée notamment des travaux de Baalbaki et al. [10, 11], de Iravani [12] et de Le Roy [13], a été retenue, car elle prend en considération le module des deux phases présentes dans le mélange, c'est-à-dire celui de la matrice E_m et celui du granulat E_g. Le module de la matrice est relié empiriquement à la résistance à la compression du béton selon la relation:

$$E_m = 226\,fc \tag{7}$$

Le module E du composite est calculé par une méthode d'homogénéisation (modèle trisphére), selon la relation:

$$E = \left(1 + 2g\frac{E_g^2 - E_m^2}{(g^* - g)E_g^2 + 2(2 - g^*)E_gE_m + (g^* + g)E_m^2}\right)E_m \tag{8}$$

où g et g* sont respectivement la compacité granulaire du mélange et sa compacité granulaire maximale.

En principe, le module E_g du granulat doit être mesuré sur la roche mère. A défaut, des essais sur bétons permettent de le déterminer, par calibrage du modèle.

3 Formules, résultats et modélisation

Les formules réalisées, présentées en [2][1], sont reprises dans le Table 1, avec les résultats à la

[1] Si nécessaire, le lecteur trouvera dans [2] la définition des paramètres utilisés dans le Table 1, ainsi que les détails sur les propriétés des matériaux et les paramètres des mélanges (granularité des sables S et des gravillons G1 et G2, nature et classe de résistance du ciment, rapports e/c, etc.). Ces données n'ont pas été reprises ici, par souci de simplification.





Table 1 Propriétés des matériaux, dosages et propriétés physiques et mécaniques des mélanges

	n°		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Granulat	Carrière		Aïn Tebournouk			Nahli			El Haroueb			Jbel Ressas			Jradou			Mixtes		
	LA		24			30			20			22			19				32*	
Mélange			a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Dosages	C	kg/m³	502	392	350	552	370	319	529	373	366	540	360	345	537	350	331	377	237	283
	e_{eff}		291	257	222	319	207	182	252	218	206	241	222	185	294	243	221	283	140	134
	S		1367	479	571	1236	653	797	1510	572	607	1482	592	612	1302	591	550	1434	753	624
	G_1		0	1143	350	0	1050	319	0	1244	366	0	1163	383	0	990	449	0	1163	283
	G_2		0	0	822	0	0	690	0	0	890	0	0	877	0	0	676	0	0	1055
Propriétés	MVR		2156	2225	2305	2063	2203	2231	2288	2408	2435	2281	2334	2409	2138	2228	2255	2103	2253	2316
	Air	l	32,6	2,8	4,6	23,4	5,8	10,2	35,1	4,7	5,6	34,4	6,3	5,9	44	9,4	6,9	43,3	10,6	5,6
	A	mm	71	76,5	75	85	79,5	80	76,5	71	73	106	76	85,5	57	62	56	68,5	89	100
Résistances mécaniques	fc_1	MPa	10,90	8,40	4,69	6,16	3,19	1,55	12,90	6,80	7,77	15,23	6,14	10,47	6,00	2,88	4,3	5,51	3,76	4,76
	fc_3		16,00	13,50	8,51	9,50	5,05	3,60	22,27	14,80	15,29	21,21	11,76	15,85	12,73	5,00	10,87	8,81	7,47	8,03
	fc_7		22,00	19,01	11,50	13,90	6,84	4,74	25,40	19,84	21,66	30,20	14,05	19,62	21,20	11,50	14,06	11,31	8,72	10,57
	fc_{14}		24,00	22,00	13,00	14,00	7,40	5,50	27,00	22,00	22,50	34,00	18,00	22,00	23,34	15,87	14,79	11,60	9,80	12,00
	fc_{28}		29,60	26,00	16,00	15,60	8,22	6,58	30,80	24,25	24,78	38,20	19,01	25,60	30,00	20,31	20,35	14,86	11,67	13,10
	fc_{90}		33,00	28,60	18,10	17,60	11,50	8,44	32,89	29,00	29,80	39,00	22,00	28,02	38,77	29,09	27,57	22,00	13,22	14,00
	fc_{180}		36,00	29,00	18, 2	20,80	12,27	9,24	36,12	31,50	30,63	39,50	23,00	31,87	43,86	33,56	31,58	26,00	14,27	16,44
	fc_{365}		41,00	34,00	24,00	23,20	13,70	10,50	41,50	36,60	36,70	44,50	33,00	37,90	48,90	33,90	35,80	34,50	16,90	19,30
	ft_1	MPa	1,80	0,98	0,45	0,66	0,34	0,24	1,34	0,85	0,86	1,56	0,62	1,14	0,70	0,39	0,42	0,65	0,38	0,42
	ft_3		1,95	1,73	0,97	1,13	0,68	0,37	2,10	1,59	1,66	2,62	1,38	1,74	1,58	1,29	1,29	0,91	0,79	0,91
	ft_7		2,67	1,87	1,35	1,30	0,91	0,50	2,33	1,92	1,95	2,90	1,77	2,26	2,07	1,88	1,83	1,24	1,01	1,24
	ft_{14}		2,81	2,25	1,48	1,35	0,95	0,73	2,68	2,13	2,45	3,05	2	2,75	2,41	2,16	2,02	1,31	1,15	1,29
	ft_{28}		3,20	2,55	1,77	1,44	1,03	0,91	3,16	2,56	2,70	3,14	2,05	3,00	2,99	2,55	2,51	1,56	1,30	1,49
	ft_{90}		3,27	3,09	1,9	1,53	1,20	1,03	3,60	2,60	3,10	3,22	2,31	3,19	3,83	3,17	3,08	2,17	1,34	1,50
	ft_{180}		3,45	3,28	2,04	1,90	1,50	1,04	3,94	2,90	3,16	3,68	2,50	3,22	4,40	3,48	3,37	2,44	1,46	1,56
	ft_{365}		3,78	3,43	2,34	2,03	1,57	1,09	4,1	3,37	3,45	4,04	2,59	3,24	4,65	3,61	3,70	3,05	1,58	1,85

*Tahent

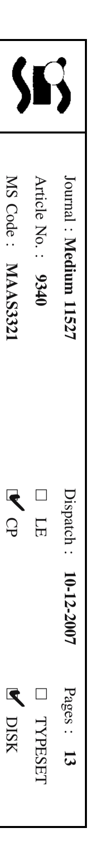
a: mortier; b: micro béton; c: béton

Journal : Medium 11527 Dispatch : 10-12-2007 Pages : 13
Article No. : 9340 ☐ LE ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3321 ☑ CP ☑ DISK

Table 2 Compacités, modules des mélanges et modules des granulats

Granulat		Aïn Tebournouk					Nahli					El Haoureb					Jbel Ressas				
âge (j)		g	g*	E_{exp} GPa	E_{calc}	E_g	g	g*	E_{exp} GPa	E_{calc}	E_g	g	g*	E_{exp} GPa	E_{calc}	E_g	g	g*	E_{exp} GPa	E_{calc}	E_g
1	Mortier	0,427	0,701	9,9	8,0	62	0,354	0,689	3,4	3,9	59	0,475	0,652	14,8	12,7	76	0,494	0,673	11,0	13,9	64
3				15,8	10,8				6,0	5,7				16,0	18,2				17,0	17,1	
7				16,7	13,6				9,0	7,8				19,2	19,8				19,0	20,9	
14				18,0	14,4				9,5	7,8				21,6	20,5				21,0	22,3	
28				20,0	16,6				10,0	8,5				22,8	22,1				25,5	23,7	
90				20,1	17,9				13,0	9,4				24,5	22,9				26,5	24,0	
180				22,2	18,9				14,0	10,7				28,2	24,2				29,0	24,1	
365				24,0	20,5				15,0	11,6				30,0	26,0				31,0	25,7	
1	Micro béton	0,570	0,684	6,6	12,9		0,577	0,736	3,4	5,1		0,627	0,695	10,0	17,4		0,628	0,709	12,0	14,1	
3				12,0	17,1				7,0	7,5				20,0	25,9				20,1	20,2	
7				15,6	20,4				8,8	9,4				25,7	29,2				21,8	22,0	
14				18,0	21,9				9,2	10,0				29,0	30,4				24	24,5	
28				20,5	23,6				12,4	10,8				31,4	31,5				24,4	25,0	
90				30,3	24,6				12,8	13,6				32,1	33,5				27,2	26,5	
180				32,0	24,7				14,1	14,2				39,0	34,5				27,5	27,0	
365				34,0	26,4				14,5	15,2				39,5	36,2				30,7	30,7	
1	Béton	0,616	0,726	10,6	9,6		0,611	0,765	2,0	2,9		0,640	0,728	10,4	17,0		0,671	0,752	18,0	20,5	
3				12,4	14,4				7,0	6,1				17,4	24,9				24,0	25,0	
7				14,0	17,2				10,0	7,6				28,7	29,2				26,9	27,3	
14				16,0	18,4				11,5	8,6				30,4	29,6				28,6	28,5	
28				18,2	20,5				13,5	9,8				31,4	30,8				30,1	30,1	
90				21,5	21,8				13,8	11,8				32,4	33,2				31,0	31,1	
180				25,2	21,9				14,1	12,5				34,0	33,5				34,0	32,5	
365				27,0	24,8				14,6	13,7				35,8	35,8				34,2	34,4	





compression obtenus sur les différents mélanges à 1, 3, 7, 14, 28, 90, 180 et 365 jours. Ce tableau est complété par les résultats de traction par fendage aux mêmes échéances. Les modules d'élasticité sont présentés dans le Table 2, avec les paramètres granulaires g et g*. Les valeurs affichées sont la moyenne de deux à quatre essais en général. La qualité des mesures a été vérifiée par comparaison des valeurs individuelles et par la cohérence de l'évolution générale des comportements.

3.1 Traction

Les résultats des mélanges issus des cinq carrières calcaires ont été reportés tout d'abord dans le même diagramme de la Fig. 1. Ils ont été reproduits individuellement ensuite dans les Fig. 2. Ces figures comparent fc à ft. Comme déjà signalé dans la littérature [6, 9], on vérifie d'une manière générale qu'il n'y a pas d'effet clairement exprimé de la taille des granulats, de leur granularité, de leurs proportions respectives, ni de l'âge des mélanges, puisque les points chronologiques qui se rapportent aux mortiers, aux micros bétons et aux bétons présentent une continuité plutôt régulière. De même, pour les faibles performances, on constate que la résistance à la traction augmente à peu près proportionnellement à la résistance à la compression, mais que cette tendance

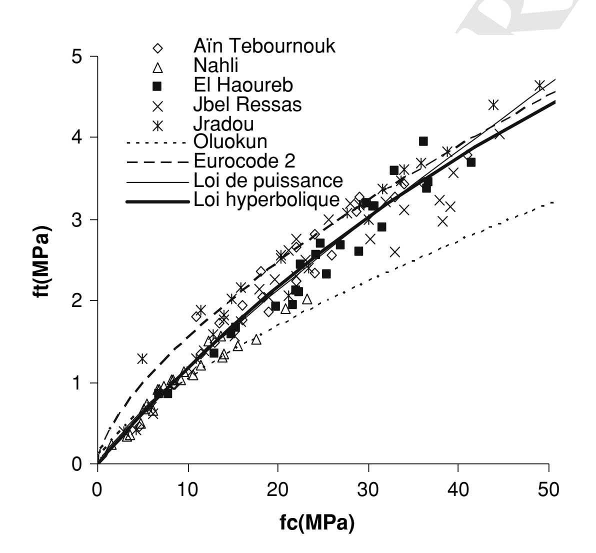


Fig. 1 Résistance à la traction ft v.s. résistance à la compression fc pour l'ensemble des mélanges des différentes carrières. Application de différents modèles

s'altère ensuite. Ce comportement traduit l'existence d'un phénomène mécanique limitant (ou effet limitant) à la traction qui est analysé ultérieurement.

Les données ont été interprétées successivement selon l'approche des modèles de loi de puissance, puis selon celle du modèle hyperbolique (voir Sect. 2.1).

3.1.1 *Interprétation des résultats selon les modèles de loi de puissance*

Le modèle de Oluokun a tout d'abord été appliqué sur l'ensemble des points (Rel. 2, courbe en pointillés sur la Fig. 1). On constate qu'il sous-estime la plupart des résultats expérimentaux, notamment les meilleures performances. On vérifie ainsi que les bétons calcaires étudiés résistent mieux en traction que ceux ayant servi a établir ce modèle, qui sont de nature siliceuse dans leur grande majorité [5]. L'écart moyen obtenu (moyenne des écarts absolus) entre expérience et lissage est de 0,50 MPa.

A l'opposé, le modèle de l'Eurocode 2 surestime les résistances en traction, en particulier les plus faibles valeurs (Rel. 4, courbe en trait discontinu sur la Fig. 1). L'écart moyen est de 0,31 MPa. Le comportement mécanique des mélanges calcaires étudiés n'est donc pas décrit de façon réellement pertinente par ces deux modèles.

Un meilleur lissage est obtenu avec la relation 1 et des valeurs m et n optimisées de 0.166 et 0.852 respectivement (courbe pleine fine sur la Fig. 1). L'écart moyen entre expérience et modèle n'est alors plus que de 0.18 MPa.

Toutefois, cette approche ne distingue pas les nuances qui apparaissent entre carrières, dont les granulats sont de qualités différentes. C'est pourquoi une nouvelle exploitation des données a été réalisée sur la base du modèle proposé par [6] (relation 3). Les courbes correspondantes sont reportées en pointillés sur les Fig. 2 et les coefficients k_t sont donnés dans le Table 3, avec les écarts moyens. On constate que ce paramètre varie significativement d'une carrière à l'autre. Il s'écarte même, dans certains cas (Nahli), de l'intervalle proposé par [6] ($0.32 < k_t < 0.47$ $MPa^{0.43}$). De même, les écarts moyens sont toujours importants. Ce modèle surestime aussi les faibles valeurs de traction et sous-estime les plus fortes (voir les courbes). Il n'est donc, non plus pas, totalement



Journal : Medium 11527 | Dispatch : 10-12-2007 | Pages : 13
Article No. : 9340 | ☐ LE | ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3321 | ☑ CP | ☑ DISK

Fig. 2 Résistance à la traction ft v.s. résistance à la compression fc pour chaque carrière. Ajustements

pertinent pour ces bétons calcaires de performances courantes, riches en fillers.

Les résultats par carrière ont alors été interprétés sur la base de la relation 1, en cherchant les paramètres m et n qui conduisent aux meilleurs ajustements. Ceux-ci sont tracés en traits discontinus sur les Fig. 2, et les valeurs de m et de n sont portées dans le Table 4, avec les écarts moyens correspondant. Les lissages s'ajustent mieux aux résultats expérimentaux, et les écarts moyens sont moindres. On dispose ainsi d'un modèle plus précis pour ces mélanges calcaires.

D'un point de vue pratique, la meilleure façon de déterminer les paramètres m et n d'un granulat est de lisser, selon la relation (1), les valeurs de compression et de traction d'une variété de mélanges hydrauliques réalisés avec ce matériau (différents dosages en ciment et/ou en eau, âges différents...). A défaut, deux bétons de résistances à la compression fc_1 et fc_2 contrastées, pour lesquels on mesure, par un nombre suffisant d'essais, la résistance à la traction ft_1 et ft_2, suffisent aussi. Dans ce cas, les paramètres m et n sont donnés par les relations suivantes:



Journal : Medium 11527 | Dispatch : 10-12-2007 | Pages : 13
Article No. : 9340 | LE | TYPESET
MS Code : MAAS3321 | CP | DISK

Table 3 Valeurs du coefficient k_t (modèle de de Larrard) et écarts moyens. Carrières calcaires

Granulat	k_t (MPa^{0,43})	Ecart moyen (MPa)	Moyenne écart moyen (MPa)
Aïn Tebournouk	0,446	0,26	0,22
Nahli	0,301	0,10	
El Haoureb	0,415	0,28	
Jbel Ressas	0,408	0,24	
Jradou	0,465	0,24	

$$n = \frac{\log\left(\frac{ft_2}{ft_1}\right)}{\log\left(\frac{fc_2}{fc_1}\right)} \text{ et } m = \frac{ft_1}{fc_1^n}\left(\text{ou } m = \frac{ft_2}{fc_2^n}\right) \qquad (9)$$

3.1.2 *Interprétation des résultats selon un modèle hyperbolique*

Les mêmes données pour l'ensemble des carrières ou pour chaque carrière peuvent aussi être ajustées au modèle hyperbolique de la relation (5). Les précisions obtenues sont comparables, voire meilleures que celles du modèle précédent. Les courbes correspondantes sont portées en traits pleins épais sur les Fig. 1 et 2 et les paramètres p′ et q′ complètent le Table 4, avec les écarts moyens associés.

Sur les Fig. 2, on observe que ce modèle s'adapte effectivement mieux aux différents cas traités, en particulier pour les plus faibles et les plus fortes performances mécaniques, à l'origine et à l'extrémité des ensembles de points. Les paramètres p′ et q′ sont donc de bons indicateurs des phénomènes physiques et mécaniques qui contrôlent le comportement du composite en traction.

Ainsi, en considérant le plan de fendage où la phase granulaire discontinue est entourée de pâte, on peut admettre que:

– si les grains sont majoritairement rompus, c'est bien la résistance du granulat qui est le facteur limitant du système. Dans le modèle hyperbolique, ce phénomène est contrôlé par le paramètre q′ qui correspond alors à un coefficient d'effet limitant du granulat à la traction
– à l'inverse, si les grains sont majoritairement déchaussés (la rupture les contourne), c'est alors la zone de contact pâte-grain qui est défaillante. Cette « auréole de transition » est souvent décrite comme un point faible de la pâte, en raison de la structure orientée des hydrates [14] et/ou du contraste de rigidité entre la pâte et le granulat. La nature du liant et du granulat, la texture du granulat, etc. jouent aussi un rôle important avec, par exemple, en présence des grains calcaires, la formation de carboaluminates qui renforcent la structure [8]. Dans le modèle hyperbolique, ce comportement est contrôlé par le paramètre p′ qui correspond alors à un coefficient décrivant la prise en compte de la « cohésion » dans la zone de transition.

On remarquera que ces considérations s'appliquent aussi au modèle de la relation 1 (loi de puissance), pour lequel l'exposant n et le paramètre m sont assimilables à deux coefficients décrivant les mêmes effets que ceux décrits précédemment.

D'un point de vue pratique, la détermination des paramètres p′ et q′ nécessite un lissage, selon la relation (5), des résultats mécaniques (compression, traction) obtenus sur plusieurs mélanges hydrauliques à base des mêmes matériaux. A défaut, deux bétons

Table 4 Valeurs des paramètres de la loi de puissance et de la loi hyperbolique et écarts moyens pour les carrières calcaires

Granulat	Loi de puissance				Loi hyperbolique			
	m (MPa^{1-n})	n	Ecart moyen (MPa)	Moyenne écart moyen (MPa)	p′	q′ (MPa^{-1})	Ecart moyen (MPa)	Moyenne écart moyen (MPa)
Aïn Tebournouk	0,173	0,841	0,16	0,16	0,141	0,013	0,21	0,15
Nahli	0,210	0,721	0,08		0,156	0,034	0,08	
El Haoureb	0,154	0,863	0,16		0,118	0,007	0,16	
Jbel Ressas	0,168	0,838	0,24		0,138	0,012	0,15	
Jradou	0,165	0,869	0,17		0,139	0,010	0,15	

a: mortier; b: micro béton; c: béton



Journal : Medium 11527 Dispatch : 10-12-2007 Pages : 13
Article No. : 9340 ☐ LE ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3321 ✔ CP ✔ DISK

de performances contrastées suffisent. Dans ce cas, les paramètres p' et q' sont donnés par les relations suivantes:

$$q' = \frac{ft_1/fc_1 - ft_2/fc_2}{ft_2 - ft_1} \quad \text{et} \quad p' = \frac{ft_1(q'.fc_1 + 1)}{fc_1} \qquad (10)$$

Les résistances fc_1, fc_2, ft_1 et ft_2 ont été définies précédemment (relation 9).

D'autre part, le comportement physique du composite soumis à la traction peut être illustré de la façon suivante:

- en absence de cohésion entre la pâte et le granulat (grains enrobés de paraffine par exemple), seule la phase liante est sollicitée sur une section réduite de la surface de rupture (i.e. la surface de pâte entre les grains dans le plan soumis à la traction). La courbe (fc, ft) est alors quasi linéaire et sa pente à l'origine (ou coefficient p') est plutôt faible
- plus la cohésion entre les deux constituants est forte, plus la résistance en traction est forte (pente p' plus élevée) car la surface sollicitée mécaniquement est plus importante. Cette surface est constituée de la pâte durcie entre les grains et de la surface de contact grains-pâte si les grains sont déchaussés, ou de la surface de rupture des grains s'ils sont cassés
- de même, plus le granulat est résistant mécaniquement, plus le composite résiste en traction, du moins tant que la cohésion dans la zone de transition (voire dans la pâte) est suffisante. C'est cette propriété qui contrôle alors la rupture (la pente p')
- inversement, si le granulat est peu performant mécaniquement, la résistance en traction subit un effet limitant, du moins si la zone de transition pâte-granulat est suffisamment robuste. La rupture est alors contrôlée par les performances mécaniques du granulat (paramètre q')
- enfin, comme dans de nombreux matériaux composites, la contrainte de rupture du système peut dépasser celle de sa phase la plus faible, en raison du confinement interne (« effet triaxial »).

Les courbes (fc, ft) interprétées par le modèle hyperbolique, et les coefficients p' et q' associés, sont donc de bons indicateurs du comportement à la traction des mélanges hydrauliques. Ainsi, dans le cas présent, la plupart des courbes montrent une quasi-linéarité *pour les faibles performances*, indiquant une rupture au contact des grains, dans l'auréole de transition. Ce comportement s'explique par une faible cohésion dans cette zone, compte tenu du jeune âge de la plupart des mélanges. Physiquement, on constate bien le déchaussement des gravillons sur les plans de fracture. Pour les *plus fortes performances*, qui correspondent généralement aux essais plus tardifs, on obtient aussi des déchaussements pour certaines carrières (El Haroueb, Jradou, Jbel Ressas). Par contre, pour les autres, ce sont les grains qui sont majoritairement fracturés (Nahli, Aïn Tebournouk), comme en attestent la plus forte courbure des graphiques correspondant (Fig. 2).

Les propriétés mécaniques des granulats et de la zone de transition contrôlent donc directement le comportement en traction des mélanges hydrauliques. Par ailleurs, on notera que le rapport des deux coefficients, c'est-à-dire p'/q' (ou m/n), a la dimension d'une contrainte (MPa). Il paraît donc légitime de vouloir comparer ce rapport aux propriétés intrinsèques du granulat, comme par exemple le coefficient Los Angeles LA toujours mesuré sur les matériaux granulaires. Pour les cinq carrières, ce coefficient est donné dans le Table 1. La Fig. 3 présente les résultats obtenus. Ils peuvent être décrits, en première approximation, par une relation linéaire dont le coefficient de détermination R^2 (indiqué sur les figures) justifie le bien fondé de l'hypothèse:

$$\frac{p'}{q'} = -0,95.LA + 34 \quad \text{ou encore} \quad \frac{m}{n} = 0,009.LA + 0.007 \qquad (11)$$

Enfin, si l'on ne dispose que d'un seul béton caractérisé par des valeurs représentatives de fc et de ft, et si le coefficient LA du granulat est connu, on peut écrire alors:

$$p' = \frac{1}{\frac{fc}{ft} - \frac{fc}{-0,95.LA + 34}} \quad \text{et} \quad q' = \frac{p'}{-0,95.LA + 34} \qquad (12)$$

3.2 Module d'élasticité

Les modules d'élasticité ont été mesurés sur les différents mélanges des carrières d'Aïn Tebournouk, de Nahli, d'El Haoureb et de Jbel Ressas. Les résultats sont portés dans le Table 2, avec les paramètres g et g* propres à chaque mélange.





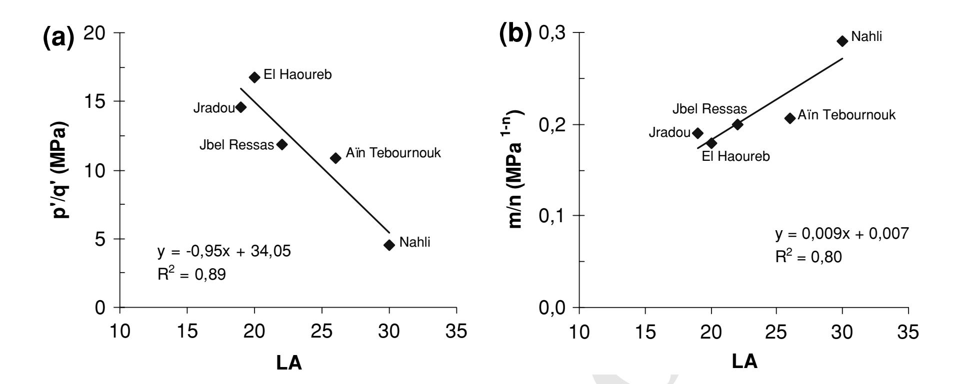


Fig. 3 Relations entre LA et p′/q′ (**a**), et m/n (**b**). Ajustements

Les modules E_g des granulats ont alors été cherchés par itérations successives, à partir des relations 7 et 8, de façon à minimiser les écarts entre les modules expérimentaux (E_{exp}) et les modules calculés (E_{calc}). Les valeurs correspondantes de E_{calc} et de E_g complètent le Table 2. On constate graphiquement sur la Fig. 4 que la dispersion des résultats est faible, ce qui valide la démarche. Au demeurant, les modules des granulats sont cohérents dans leur distribution avec les résistances mécaniques des matériaux (coefficient LA par exemple).

4 Validation du modèle de traction

D'autres mélanges contenant différentes sources de granulats ont été réalisés dans le but d'apporter une validation de l'approche présentée précédemment pour la traction. Il s'agit d'un mortier à base de sable siliceux (carrière d'El Khlédia), d'un micro béton contenant ce sable et le gravillon fin calcaire de la carrière de Tahent, et d'un béton avec ces deux matériaux et le gravillon de Nahli. Les formules correspondantes et les performances mécaniques obtenues complètent le Table 1.

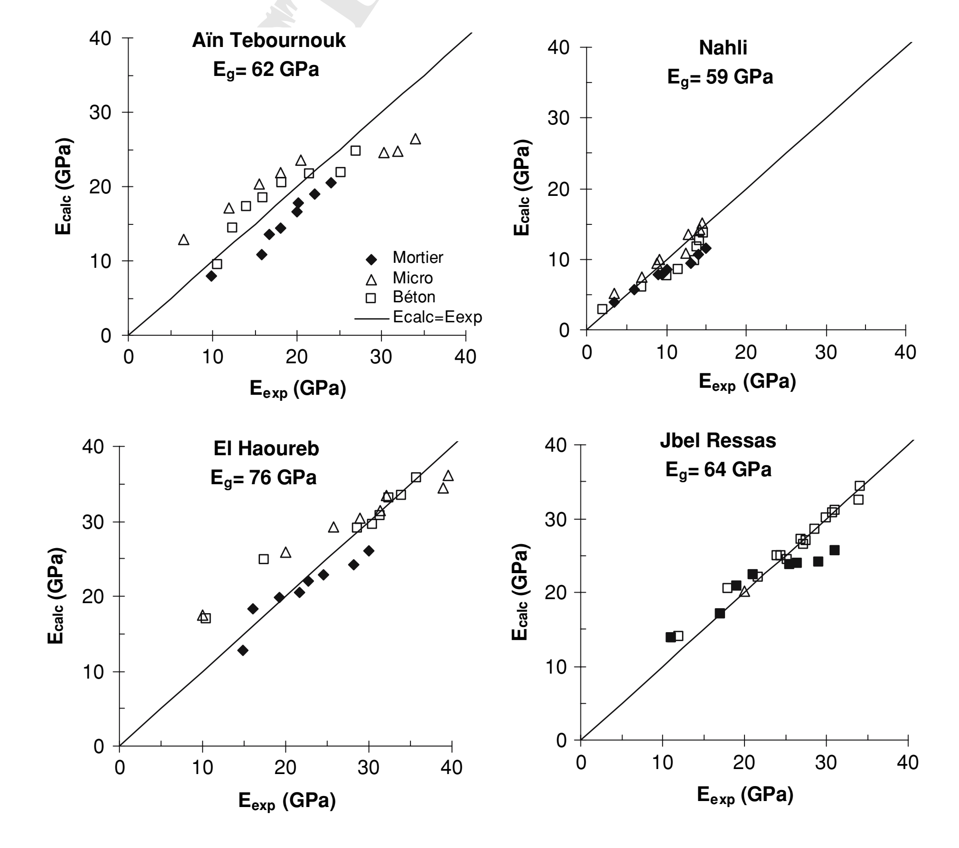
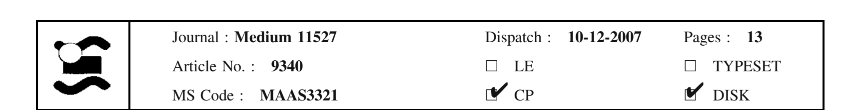


Fig. 4 Comparaison des modules mesurés et des modules calculés pour les mélanges. Module des granulats





Les Fig. 5 comparent les résultats de compression et de traction pour les trois formules.

Dans un premier temps, les coefficients d'effet de cohésion et d'effet limitant des trois types de mélange ont été déterminés par lissage des points expérimentaux. Les courbes correspondantes (traits pointillés pour la loi de puissance et traits continus pour la loi hyperbolique) sont tracées sur les Fig. 5 et les coefficients associés sont donnés dans le Table 5. Comme il s'agit de valeurs qui se rapportent à des mélanges à base de granulats de différentes natures, elles sont notées p'' et q'' (et m'' et n'').

Cependant, comme les mortiers ne sont constitués que du sable d'El Khlédia, les valeurs p'' et q'' (m'' et n'') affichées sont en fait les coefficients p' et q' (m et n) de ce sable. C'est un matériau dur et de nature siliceuse pour lequel on trouve un effet de cohésion limité, et un effet limitant moindre.

Les valeurs de p' et q' (m et n) pour le calcaire tendre de Tahent ont été trouvées par étapes, à partir des essais sur micro bétons, en admettant que:

– le paramètre p'' (m'') combine l'effet du sable siliceux et du gravillon calcaire, au prorata de leurs fractions volumiques respectives dans le mélange. On suppose ainsi que « l'effet de cohésion » dépend des surfaces de contact propres à chaque matériau. Le coefficient p' (m) du gravillon de Tahent a alors été calculé à partir d'une règle de proportionnalité associant le paramètre p'' (m'') du mélange, le paramètre p' (m) du sable d'El Khlédia, et les proportions volumiques respectives des deux constituants
– l'effet limitant est tributaire uniquement de la résistance du granulat. Le coefficient q' (n) concernant Tahent a alors été déterminé à partir de la relation 11, en utilisant la valeur LA de ce matériau (Table 1).

Les proportions volumiques et les valeurs des coefficients p' et q' (et m et n) sont données dans le Table 6.

Enfin, les valeurs du gravillon de Nahli ont été calculées selon le même principe, toujours à partir des coefficients p'' et q'' (m'' et n'') mesurés sur les bétons (Table 5):

– le paramètre p' (m) a été déterminé à partir des paramètres p' du sable d'El Khédia et du gravillon de Tahent, et des dosages volumiques respectifs

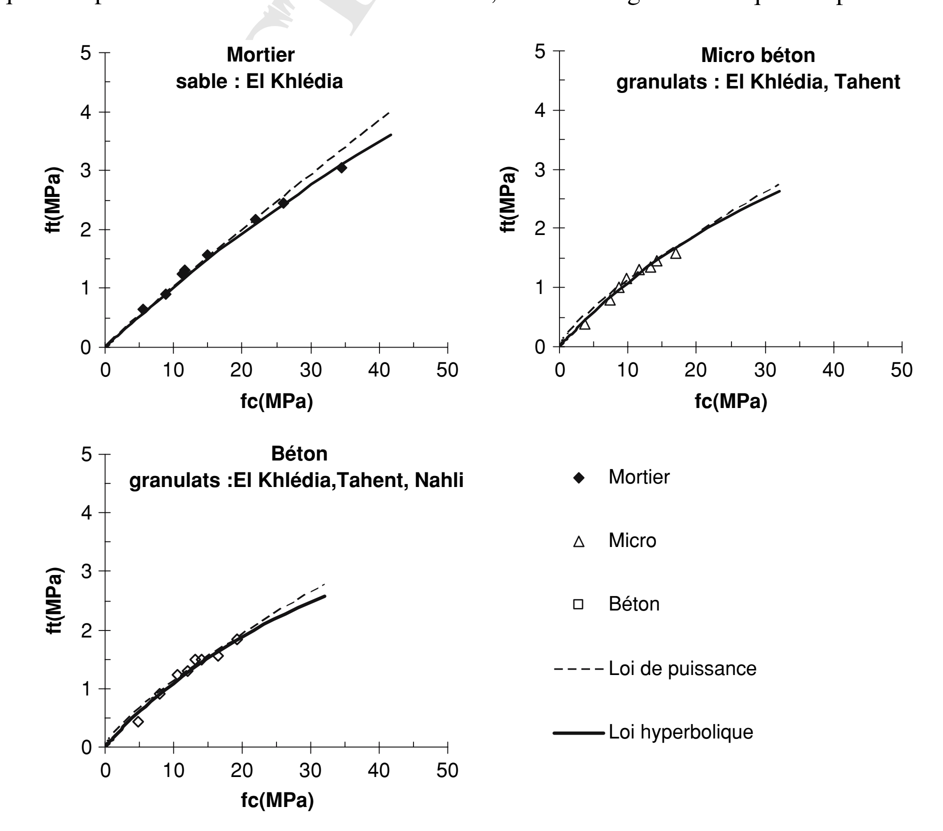


Fig. 5 Validation sur mélanges mixtes




Journal : Medium 11527
Article No. : 9340
MS Code : MAAS3321
Dispatch : 10-12-2007
Pages : 13
☐ LE
☑ CP
☐ TYPESET
☑ DISK

Table 5 Coefficients p″ et q″ (et m″ et n″) mesurés sur les mélanges mixtes

		Paramètres des mélanges					
		Loi de puissance			Loi hyperbolique		
		m″ (MPa^{1-n})	n″	Ecart moyen (MPa)	p″	q″ (MPa^{-1})	Ecart moyen (MPa)
Mélanges	a	0,115	0,950	0,09	0,108	0,006	0,07
	b	0,188	0,771	0,06	0,129	0,018	0,05
	c	0,186	0,779	0,07	0,134	0,021	0,06

a: mortier; b: micro béton; c: béton

Table 6 Coefficients p′ et q′ (et m et n) concernant les granulats des mélanges mixtes

	Proportions volumiques des mélanges			Paramètres des granulats			
				Loi de puissance		Loi hyperbolique	
Granulat	a %	b	c	m (MPa^{1-n})	n	p′	q′ (MPa^{-1})
El Khlédia	100	36,62	28,67	0,115	0,950	0,108	0,006
Tahent		63,68	15,85	0,230	0,780	0,141	0,055
Nahli			55,48	0,210	0,758	0,145	0,031

a: mortier; b: micro béton; c: béton

– le paramètre q′ (n) a été déduit de la relation 11 et de la valeur de LA de Nahli.

Les valeurs correspondantes complètent les Table 6. On constate que celles trouvées pour le gravillon de Nahli (p′ = 0,145, q′ = 0,031) s'accordent plutôt bien avec celles déterminées initialement sur les mélanges à base uniquement de ce calcaire (p′ = 0,156, q′ = 0,034, voir Table 4). Ce résultat, fondé sur l'hypothèse que le paramètre de cohésion p″ d'un mélange mixte est proportionnel aux paramètres p′ de chacun de ces constituants, pondérés par les volumes relatifs respectifs, apporte une première validation des résultats de traction obtenus dans le cadre de ces travaux sur des mélanges calcaires tunisiens.

5 Conclusion

Ces travaux sur la résistance à la traction et le module d'élasticité de mélanges hydrauliques calcaires complète ceux initialement réalisés à la compression sur les mêmes matériaux. Ces deux études forment ainsi un ensemble complet de résultats originaux qui permettent de mieux caractériser les ressources granulaires tunisiennes en vue de leur valorisation dans les bétons, voire dans certains mélanges routiers.

Les données ont été traitées le plus souvent sur la base des modèles les plus récents, dont ceux du LCPC français qui constituent d'excellents outils de formulation et de prédiction des comportements pour une large gamme de mélanges. Des extensions ont toutefois dû être proposées pour permettre leur adaptation au cas particuliers des mélanges riches en fillers calcaires.

Pour la traction, les modèles « généraux », qui relient compression et traction par une loi de puissance, ne donnent pas de résultats réellement satisfaisants pour les mélanges calcaires si leurs deux paramètres ne sont pas ajustés aux données. Dans ce cas, un autre modèle hyperbolique a été proposé. Il convient mieux pour les faibles et les fortes résistances et il a l'avantage d'associer de façon plus explicite ses paramètres à la cohésion dans la zone de transition pâte-granulat, et à la résistance limite du granulat en traction. Ce modèle a été validé sur quelques mélanges mixtes contenant des matériaux siliceux et calcaires. Il conviendrait encore de vérifier sa pertinence sur d'autres matériaux, comme par exemple les mélanges traités aux liants hydrauliques destinés aux chaussées, où la résistance en traction, généralement faible, joue un rôle déterminant. Le comportement en traction de ces produits pourrait ainsi être mieux décrit avec ce modèle. Il permettrait incidemment de favoriser l'emploi des calcaires tunisiens dans les bétons et les assises de chaussées et, donc, de préserver les ressources de meilleure qualité.

Journal : Medium 11527 | Dispatch : 10-12-2007 | Pages : 13
Article No. : 9340 | ☐ LE | ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3321 | ☑ CP | ☑ DISK

Références

1. Achour T (2007) Étude de l'influence de la nature des granulats sur les propriétés des bétons hydrauliques: cas des granulats calcaires tunisiens. Thèse de doctorat ENIT/UHP (en cours)
2. Achour T, Lecomte A, Ben Ouezdou M, Mensi R, Joudi I (2007) Contribution of the fillers limestones to the paste-aggregate bond: Tunisian examples. Mater Struct J, à paraître
3. Norme NF EN 12390-6 (2001) Essai pour béton durci—Partie 6 : résistance en traction par fendage d'éprouvettes, Afnor
4. Norme ISO 6784 (1982) Béton. Détermination du module d'élasticité statique en compression. Afnor
5. Oluokun FA (1991) Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: evaluation of existing relations for normal weight concrete. ACI Mater J 88(3):302–309
6. de Larrard F (1999) Concrete mixture proportioning. A scientific approach. In: Mindess S, Bentur A (eds) Modern concrete technology, 9. E & FN Spon, London
7. Norme NF EN 1992–1 (2005) Eurocode 2—Calcul des structures en béton—Partie 1–1: règles générales et règles pour les bâtiments. Afnor
8. Lecomte A (2000) Contribution à la valorisation des ressources minérales de la Lorraine et du Luxembourg. HDR. Université Henri Poincaré Nancy 1
9. Neville AM (1995) Properties of concrete, 4th edn. Longman, Harlow
10. Baalbaki W, Benmokrane B, Chaallal O, Aïtcin PC (1991) Influence of coarse aggregate on elastic properties of high-performance concrete. ACI Mater J 88(5):499–503
11. Baalbaki W, Aïtcin PC, Ballivy G (1992) On predicting modulus of elasticity in high-strength concrete. ACI Mater J 89(5):517–520
12. Iravani S (1996) Mechanical properties of high-performance concrete. ACI Mater J 93(5):416–426
13. Le Roy R (1996) Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances. Etudes et Recherches des LPC, OA 22:350 p
14. Maso JC (1982) La liaison pâte-granulat. In: Le béton hydraulique. Presses de l'ENPC, Paris, pp 247–259

rilem

Journal : Medium 11527 | Dispatch : 10-12-2007 | Pages : 13
Article No. : 9340 | ☐ LE | ☐ TYPESET
MS Code : MAAS3321 | ☑ CP | ☑ DISK

Conclusion

Rappelons, au terme de cette étude, que l'objectif était de tester la faisabilité de bétons hydrauliques courants avec des granulats calcaires provenant des gisements tunisiens. Jusqu'à présent, en Tunisie, la pratique est de recourir à des granulats dont les caractéristiques sont « bonnes » mécaniquement, physiquement et chimiquement. Cependant, les ressources ayant ces qualités ne sont pas inépuisables et certaines sont aujourd'hui surexploitées, notamment à proximité des gros centres de consommations, comme le district de Tunis et la zone côtière touristique. L'étude quantitative, à partir des rares données disponibles, de l'évolution de la demande et de la production des granulats, a permis de montrer que certaines régions du pays peuvent être déficitaires dans un futur proche. Pour combler ce déficit, le Ministère de l'Équipement, de l'Habitat et de l'Aménagement du Territoire (MEHAT) a fixé les dispositions à entreprendre pour répondre favorablement au développement du secteur de la construction dans toutes les régions. La Tunisie dispose sur son territoire, de façon assez bien répartie, d'une grande diversité de formations géologiques, de nature calcaire en majorité. La démarche du ministère comprend deux aspects. La première est de chercher à étendre les gisements déjà connus par la qualité de leur produit (extension ou ouverture de nouvelles exploitations dans les mêmes formations, à proximité des carrières existantes). La seconde est l'ouverture de nouvelles exploitations dans des formations non encore exploitées. Pour cela, le MEHAT a choisi les gisements de Aïn Tebournouk, de Nahli, de El Haoureb, de Jbel Ressas, de Jbel Lansarine (remplacé dans le cadre de ce travail par Tahent), de Jradou et de El Khlédia comme sources d'approvisionnement potentielles aptes à donner des granulats à bétons. Ces sites ont été étudiés dans le cadre du présent travail. Les granulats qu'ils produisent actuellement ont été soumis aux essais habituels ou plus particuliers de caractérisation. Pour la plupart, les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas d'interdiction d'utilisation dans le béton, puisqu'ils présentent des caractéristiques satisfaisantes, eues regard aux spécifications de la norme actuellement en vigueur. Cependant, pour Nahli et Tahent, les propriétés générales sont moins favorables, avec notamment des teneurs en fillers et une absorption plutôt élevées.

Les travaux entrepris dans le cadre de cette thèse se sont intéressés plus particulièrement aux propriétés de résistance à la compression, de résistance à la traction et de module d'élasticité des mélanges hydrauliques réalisés. Pour étudier ces propriétés, les

modèles récents proposés par le LCPC français ont été utilisés. Ces modèles constituent une innovation dans le domaine du béton. Ils sont, pour une large gamme de mélanges, d'excellents outils de formulation et de prédiction des comportements. Les lois qu'ils utilisent font intervenir les propriétés des constituants et de leur assemblage dans le composite, ce qui constitue une approche plus réaliste que celles, plus empiriques, qui existent jusqu'à présent. Ces modèles ont été calibrés expérimentalement sur des bétons et des mortiers dont leurs distributions granulaires étaient généralement optimisées. Ils ont été validés sur des matériaux de diverses natures. Dans notre étude, les formules de mélanges hydrauliques réalisées avec les granulats calcaires sélectionnés n'ont pas toujours été équilibrées sous l'aspect granulométrique. De ce fait, ils s'écartent, pour certains, du domaine couvert par les prévisions de ces modèles.

En ce qui concerne la résistance à la compression, nos recherches ont permis de proposer une extension du modèle, pour retrouver les mesures expérimentales. Le paramètre qui décrit l'adhérence pâte-granulat a dû être associé à la teneur relative en fillers des granulats. L'hypothèse est que la présence des éléments fins, de même nature que les granulats, améliore l'encrage entre pâte et granulat, grâce au rapprochement des propriétés de rigidité des deux matériaux et à une meilleure homogénéité du système. L'étude des données expérimentales montre que les mélanges courants présentent des performances à la compression intéressantes, du moins dans la plage de résistance étudiée, même s'ils contiennent une teneur en fillers plutôt élevée. Le modèle ainsi étendu a été validé sur des mélanges mixtes de granulats, avec le même type de ciment. Il conviendrait de vérifier sa pertinence avec d'autres types de ciments car les propriétés de la matrice cimentaire risquent d'évoluer, tant en résistance qu'en rigidité, ce qui peut amener à conforter l'hypothèse basée sur le rapprochement des rigidités.

En ce qui concerne la résistance à la traction par fendage, les résultats des essais réalisés sur les bétons calcaires ont été interprétés à partir d'une loi hyperbolique, analogue dans sa forme à celle utilisée pour décrire le comportement à la compression des bétons. Les deux paramètres de cette loi sont alors considérés comme des indicateurs de la cohésion pâte-granulat dans la zone de contact, et de la résistance limite du granulat à la traction. Pour les faibles valeurs de résistance, c'est généralement la cohésion qui joue un rôle dominant. Pour les plus fortes résistances, c'est l'effet limitant du granulat qui contrôle le mécanisme de rupture du composite à la traction. La pertinence de ce modèle a été validée sur des mélanges

mixtes avec des granulats calcaires et siliceux, en partant de l'hypothèse que « l'effet de cohésion » était proportionnel au volume des phases présentes dans le matériau. Comme pour la compression, il conviendrait de vérifier la pertinence de ce modèle sur d'autres matériaux, comme par exemple les mélanges traités aux liants hydrauliques destinés aux chaussées, où la résistance en traction, généralement faible, joue un rôle déterminant.

Enfin en ce qui concerne le module d'élasticité, l'application du modèle du LCPC (modèle trisphère) a permis de retrouver les modules des granulats. Les résultats obtenus sont cohérents avec l'ordre de classement de la résistance mécanique des roches mères, ce qui confirme la pertinence de ce modèle. Les roches qui présentent les plus fortes résistances intrinsèques ont les modules d'élasticité les plus élevés. L'étude de l'évolution du module d'élasticité dans le temps, sur certains mélanges hydrauliques, a permis de mieux comprendre l'effet de la nature du granulat.

Au terme de ce travail, on peut prétendre que les résultats obtenus contribuent à une meilleure connaissance des ressources granulaires tunisiennes. Ils apportent des réponses sur les possibilités d'utilisation des ressources sélectionnées dans les mélanges hydrauliques, avec toutefois des nuances selon l'origine des matériaux. Ainsi les formations calcaires de Jbel Ressas, de El Haoureb, de Jradou et de Aïn Tebournouk fournissent des granulats aptes à entrer dans la composition de bétons hydrauliques de qualité courante, même (et surtout) si les sables contiennent un taux de fillers relativement important. Les matériaux de Nahli et de Tahent sont de moins bonne qualité et, dans l'état actuel de leur production, ils ne peuvent servir que pour des bétons peu performants. Tous ces matériaux sont caractérisés par un taux de fillers important, dont la présence a été prise en compte dans la prévision des performances. Il serait toutefois nécessaire de compléter cette étude par une recherche plus rigoureuse sur le rôle de cette fraction fine sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons calcaires, recherche qui pourrait être couplée à une étude de durabilité. Enfin, ce travail de thèse a permis d'accéder aux nouveaux outils de formulation des bétons, dont la portée est bien supérieure à celle des méthodes empiriques actuellement utilisées. Ils pourront maintenant être utilisés en Tunisie, pour mieux formuler les bétons traditionnels ou à base de ces ressources de substitution de demain.



FACULTE DES SCIENCES & TECHNIQUES

RAPPORT DE SOUTENANCE

Concernant la thèse de **Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1**

en Genie Civil

Présentée par : Taoufik ACHOUR

Date de la soutenance : 15/11/2007

Faculté des Sciences et Techniques

Le candidat a traité un sujet lié au contexte tunisien, à savoir l'étude de la faisabilité de bétons hydrauliques avec des granulats calcaires issus des principales carrières du pays. Sa recherche est caractérisée, en particulier, par une contribution expérimentale remarquable. Malgré les difficultés inhérentes à l'usage des sables concassés, les données fiables qu'il a obtenues lui ont permis de proposer une extension originale des récents modèles de résistance à la compression et à la traction des bétons proposés par le LCPC français. Ces outils, très bien maîtrisés par le candidat, sont ainsi mieux adaptés aux mélanges riches en fillers calcaires.
Ses résultats ont permis également de proposer des recommandations utiles aux praticiens, en vue de l'exploitation des carrières tunisiennes.
La présentation orale du candidat a été de très grande qualité. Ses réponses aux questions ont toujours été pertinentes et convaincantes.

Président du Jury - Nom, Prénom et signature : Mounir BOUASSIDA

Membres du Jury - Nom, Prénom et signature :

de LARRARD François

Lecomte André

MENSI Rachid

BEN OUEZDOU Mongi

N.B. De par décision du Conseil d'administration de l'Université en date du 2 décembre 2002, les jurys de soutenance de thèse de l'UHP Nancy 1 n'attribuent plus aucune mention à compter du 1er janvier 2003.

3C-F8A **A retourner au Service de la Scolarité de la Faculté des Sciences & Techniques dans les meilleurs délais.**

— Domaine Scientifique Victor Grignard - B.P. 239 - F 54506 VANDŒUVRE-lès-NANCY Cédex - France —
Tél. : 03 83 68 40 36 - International : 00 333 83 68 40 36 - Fax : 03 83 68 40 01 - www.scadmin.uhp-nancy.fr - Adresse électronique : doctorat-sciences@scadmin.uhp-nancy.fr



FACULTE DES SCIENCES & TECHNIQUES

Service de la Scolarité
Affaire suivie par : Georges BILLANT

AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

Ecole Doctorale
...EMMA...

Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I en
..Génie Civil..

Nom et prénom de l'auteur : ACHOUR TAOUFIK
Date de la soutenance : 15/11/2007

Président du Jury - Nom, Prénom : BOUASSIDA Mounir
Membres du Jury - Nom, Prénom :
de LARRARD François
Lecomte André
MENSI Rachid
BEN OUEZDOU Mongi

☒ Thèse pouvant être reproduite en l'état

☐ Thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées au cours de la soutenance

☐ Thèse ne pouvant être reproduite

Le 15/11/2007
Le Président du Jury

3C-F8B **A renvoyer au Service de la Scolarité de la Faculté des Sciences & Techniques dans les meilleurs délais.**



Monsieur **ACHOUR Taoufik**

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE HENRI POINCARE, NANCY 1

en GENIE CIVIL

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER n°1467

Nancy, le 29 novembre 2007

Le Président de l'Université

UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ, NANCY I
LE PRESIDENT

J.P. FINANCE

Université Henri Poincaré, Nancy I
24-30 rue Lionnois - B.P. 3069 - 54013 NANCY Cédex
Tél. : 03 83 68 20 00 - Fax : 03 83 68 21 00

RESUME

Ce travail de thèse s'intéresse à la valorisation des ressources granulaires tunisiennes, de type calcaire, dans les mélanges hydrauliques. Les matériaux utilisés sont issus des carrières de Aïn Tebournouk, Nahli, Jbel Ressas, El Haoureb, Jradou et Tahent qui sont appelées à alimenter les principaux centres de consommation de la région de Tunis et de la zone côtière du Centre-Est. Les propriétés analysées sont les résistances en compression et en traction et le module d'élasticité. Les récents modèles du LCPC français ont été utilisés pour prédire ces propriétés. Ils ne donnent pas toujours des résultats satisfaisants, en particulier si les mélanges sont riches en éléments fins, comme c'est souvent le cas avec des granulats issus de carrières. Les mortiers, micro-bétons et bétons réalisés dans le cadre de ce travail ont permis de proposer une extension de ces modèles. Pour la résistance à la compression, le coefficient d'adhérence a été associé à la teneur en fillers des granulats. L'hypothèse est que la présence des éléments fins, de même nature que les granulats, améliore l'adhérence pâte-granulat, grâce au rapprochement des propriétés de rigidité des deux matériaux. Pour la résistance à la traction, un modèle décrit par une loi hyperbolique a permis d'apporter une interprétation physique au comportement à la traction des mélanges hydrauliques. Ses paramètres sont reliés à la résistance du granulat et à la cohésion dans la zone de transition pâte-granulat. Enfin pour le module d'élasticité, l'utilisation du modèle du LCPC, qui prend en compte les propriétés de la phase granulaire et de la phase liante, a permis d'atteindre le module d'élasticité de certains granulats.

Mots-clés : Granulats, fillers calcaires, bétons calcaires, formulation, effet d'adhérence, compacité, résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité, modélisation

ABSTRACT

This study concerns the Tunisian granular resources, of limestone type, in the hydraulic mixtures. The used materials outcoming from the careers of Aïn Tebournouk, Nahli, Jbel Ressas, El Haoureb, Jradou and Tahent which have to feed the principal centers of consumption of the area of Tunis and the coastal zone of Center-East. The analyzed properties are the compressive and the tensile strengths and the elastic modulus. The recent models of the French LCPC were used to predict these properties. They do not always give satisfactory results, in particular if the mixtures are rich in fine elements, as it is often the case of the aggregates outcoming from careers. The mortars, micro-concretes and concretes carried out within the framework of this study made it possible to propose an extension of these models. For the compressive strength, the bond coefficient was associated with the content of fillers aggregates. The assumption is that the presence of these fine elements, of comparable nature that the aggregates, improves adherence paste and aggregate, thanks to bringing together the properties of rigidity of the two materials. For the tensile strength, a model describes by a hyperbolic law made it possible to provide a physical interpretation to the tensile strength behavior of the hydraulic mixtures. Its parameters are linked to the aggregate strength and cohesion in the paste-aggregate transition zone. Finally for the elastic modulus, the use of the model of the LCPC, which takes into account the properties of the granular phase and the binding phase, made it possible to reach the modulus of elasticity of some aggregates.

Key-words: Aggregates, limestone's fillers, limestone's concretes, proportioning, bond effect, packing density, compressive strength, tensile strength, elastic modulus, modelling.